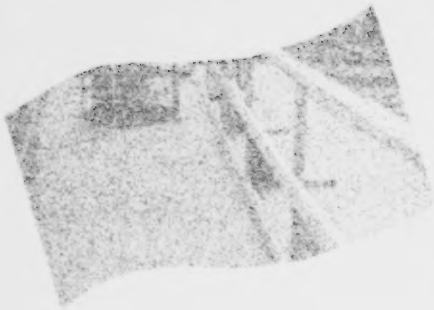
Développement et validation d'une méthode d'évaluation des garde-corps fabriqués et installés à pied d'œuvre sur les chantiers

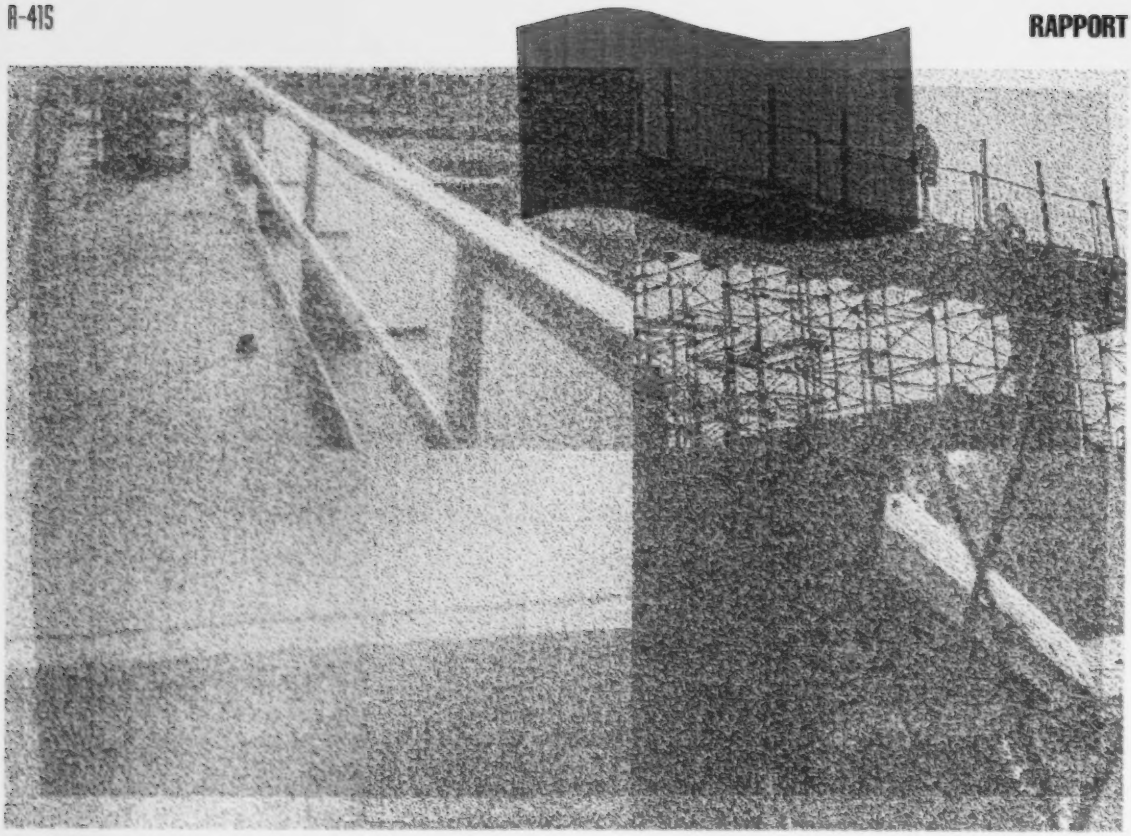


ÉTUDES ET RECHERCHES

André Lan
Jean Arteau
Renaud Daigle

R-415

RAPPORT



irsst

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent* pour vous !

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, mai 2005

Développement et validation d'une méthode d'évaluation des garde-corps fabriqués et installés à pied d'œuvre sur les chantiers

ÉTUDES ET RECHERCHES

André Lan, Jean Arteau et Renaud Daigle

Sécurité-ingénierie, IRSST

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca

Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

SOMMAIRE

Le travail en hauteur comporte des risques importants de chute contre lesquels il faut protéger les travailleurs. En 1998, le taux moyen de cotisation à la Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec (CSST) était environ 2,50 $, alors que le taux moyen des entreprises œuvrant dans le travail en hauteur avoisinait les 30 $. Ce taux élevé illustre bien l'incidence des accidents graves et mortels dans ce secteur d'activité. Les réglementations québécoise et internationale sont très claires; il faut protéger les travailleurs exposés à un risque de chute de 1.8 mètre ou plus. Le garde-corps est le moyen collectif de protection le plus approprié pour protéger les travailleurs contre les risques de chute lorsqu'ils œuvrent sur un plancher. Comme les garde-corps en bois et les garde-corps avec des étais métalliques comme supports sont souvent fabriqués et installés à pied d'œuvre sur les chantiers, il est extrêmement difficile aux inspecteurs de la CSST de vérifier si ceux-ci sont sécuritaires.

Les objectifs de la présente étude visaient à : 1) vérifier si la conception et l'installation des garde-corps fabriqués et installés à pied d'œuvre sur les chantiers de construction sont sécuritaires et rencontrent les exigences des articles 3.8.2 et 3.8.3 du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec (S-2.1, r.6) pour assurer aux travailleurs une meilleure protection contre les chutes et définir les paramètres d'ancrage; 2) comparer et analyser les exigences de résistance des règlements et normes internationaux et proposer si possible, un critère enveloppe synthèse des exigences de résistance qui reflètent mieux la réalité; 3) définir le couple de serrage minimal pour assurer la sûreté d'un étai métallique comme support de garde-corps; et à 4) définir un critère de flèche pour les garde-corps.

Les démarches suivies comprenaient : 1) des observations et des entrevues avec les responsables de la santé et de la sécurité du travail (SST) et les contremaîtres sur les chantiers pour répertorier les différents types de garde-corps utilisés sur les chantiers du Montréal métropolitain en vue de sélectionner le(s) garde-corps le(s) plus prometteur(s) et colliger des données sur ce(s) garde-corps afin de pouvoir le(s) reconstituer au laboratoire; 2) développement d'une méthode et d'un protocole d'essais pour vérifier si les garde-corps fabriqués et installés à pied d'œuvre sont conformes aux exigences du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec; 3) des essais au laboratoire pour : a) évaluer la résistance des systèmes de garde-corps suivant le protocole d'essais; b) déterminer le couple minimal de serrage des étais métalliques utilisés comme supports pour les garde-corps et le coefficient de friction béton-plaque d'appui en contreplaqué; c) définir un critère de flèche pour les garde-corps; et 4) analyser les résultats en vue de formuler des recommandations.

Les résultats de cette étude ont montré que :

- Les garde-corps en bois réalisés couramment sur les chantiers ne rencontrent pas toujours les exigences de l'article 3.8.2 du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec, S-2.1, r.6;
- Les essais dynamiques avec le torse de bois de 100 kg sont des essais très sévères et ne reflètent pas la réalité de l'impact du travailleur sur la lisse supérieure;
- Un technicien muni d'une clé de 300 mm arrive à introduire des forces de 18 à 20 kN, que la vis de l'étai soit sèche ou huilée lors des essais de serrage avec un étai instrumenté et

105-06294/

calibré. Cette force est 10 fois la charge appliquée et le coefficient de friction contreplaqué-béton, déterminé expérimentalement est $\mu = 0.44$ à 0.49;

- La comparaison des exigences de résistance des règlements ne permet pas de proposer un critère enveloppe synthèse des exigences de résistance qui reflètent mieux la réalité;
- Il doit y avoir un effort d'harmonisation des exigences de résistance, surtout pour les règlements d'un même pays, par exemple le S-2.1, r.6 et le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST);
- Le mannequin bascule par-dessus la lisse supérieure quel que soit la nature de la lisse supérieure lorsque celle-ci est à 0.90 m de haut par rapport à la surface de travail lors des essais de basculement avec des lisses faites de 2x4, d'un câble d'acier d'un ½ po. de diamètre et d'un câble en polypropylène de ¾ po. de diamètre; nous proposons donc le critère de flèche suivant :
  "Lorsque les charges de 450 N verticale et 900 N horizontale s'appliquent sur la lisse supérieure, celle-ci ne doit pas se déformer à une hauteur inférieure à 0.95 m au-dessus de la surface de travail";
- Aux chantiers, le protocole d'essais peut être appliqué relativement facilement.

Ces résultats ont permis de faire les recommandations suivantes :

- Le montant de 2x4 doit être orienté de façon à ce que la plus grande dimension de 4 pouces résiste à la flexion;
- L'ancrage des garde-corps en bois doit être solidifié en utilisant trois clous;
- Les garde-corps avec des étais métalliques comme supports sont très fiables et peuvent être utilisés en toute sécurité sur les chantiers comme le recommande le "Construction Safety Association of Ontario (CSAO)";
- L'utilisation d'un bois de meilleure qualité et le critère de flèche feront l'objet de recommandations auprès du Comité de révision du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec pour qu'ils soient inclus dans les articles relatifs aux garde-corps dans le Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec S-2.1, r.6;
- D'initier la phase 2 de l'étude pour : 1) définir le heurt réaliste le plus sévère d'une personne sur un garde-corps en prenant en compte la déformabilité du corps humain; 2) traduire ce heurt en termes mécaniques (recours à la biomécanique); et 3) traduire ce heurt en termes de sollicitations du garde-corps (les caractéristiques mécaniques du garde-corps et du corps humain doivent intervenir).

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette étude a été rendue possible grâce à la collaboration d'un grand nombre d'organisations et d'individus. Nous tenons particulièrement à remercier les organisations et les personnes suivantes, entre autres :

- Les Directions régionales de la CSST de Laval et de Montréal 1;
- Les chantiers de construction qui nous ont accueillis afin de nous permettre de colliger des données sur les garde-corps;
- Les coffrages Dominic et Monsieur Martini, Surintendant;
- Les travailleurs présents sur les chantiers de construction;
- Monsieur Jean-Guy Bergeron, Direction régionale de la CSST de Laval;
- Messieurs Laval Côté, Nardi, Alain Rondeau, Jacques Roy, Surintendants de chantiers;
- Monsieur Evans Gagnon, Responsable SST;
- Monsieur Yves Landry, inspecteur à la Direction régionale de la CSST de Laval;
- Monsieur Carol Leblond, inspecteur à la Direction régionale de la CSST de Montréal 1;
- Monsieur Raymond Paquette, Agent de Prévention Construction;
- Monsieur Jean-Jacques Rouleau, inspecteur à la Direction régionale de la CSST de Laval.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE i

REMERCIEMENTS iii

TABLE DES MATIÈRES v

Liste des tableaux ix

Liste des figures xi

1. INTRODUCTION - PROBLÉMATIQUE DE SANTÉ ET SÉCURITÉ DU TRAVAIL 1
   - 1.1. État des connaissances scientifiques ou techniques sur le sujet 2
     - 1.1.1. Normes et règlements 2
     - 1.1.2. Les exigences des normes et règlements 3
     - 1.1.3. Critères de flèche 9
     - 1.1.4. Efficacité, fiabilité et convivialité d'un garde-corps 10
     - 1.1.5. Les ancrages 17
     - 1.1.6. Les essais sur les garde-corps 18
     - 1.1.7. Méthode d'essais de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) 19
     - 1.1.8. Garde-corps en bois 21
     - 1.1.9. Garde-corps faits de cadres métalliques ou en bois attachés avec des broches à des étais métalliques comme supports 22

2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE 25

3. DÉMARCHES SUIVIES 25
   - 3.1. Observations sur les chantiers 25
     - 3.1.1. Principales constatations des observations aux chantiers 26
   - 3.2. Méthode de vérification - Protocole d'essais 30
     - 3.2.1. Description du protocole d'essais - Première partie 30
     - 3.2.2. Deuxième partie - Essais dynamiques 32
   - 3.3. Les essais au laboratoire 32
   - 3.4. Présentation générale des essais 33
     - 3.4.1. Généralités 33
     - 3.4.2. Matériaux 34
       - 3.4.2.1. Béton 34
       - 3.4.2.2. Ferraillage 34
       - 3.4.2 3. Bois 34
       - 3.4.2.4. Étais et cadres 34
   - 3.5. Montage 34
     - 3.5.1. Dalles de support 34
   - 3.6. Garde-corps 36
     - 3.6.1. Garde-corps de type 1 36
     - 3.6.2. Garde-corps de type 2 37

3.7. Instrumentation 38

4. SÉRIE 4 : ESSAIS STATIQUES SUR DES GARDE-CORPS EN BOIS 41
4.1. Description des essais 41
4.2. Essai 4-1 : Essais statiques sur un montant en bois 41
4.3. Essai 4-2 : Essai statique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois 42
4.4. Essai 4-3 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps 44
4.5. Essai 4-4 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps 45
4.6. Résultats et observations 46
4.6.1. Résumé des résultats 46
4.6.2. Observations sur les essais de la série 4 46
4.7. Résultats et observations sur les essais statiques de la série 4 48

5. SÉRIE 5 : ESSAIS DYNAMIQUES SUR DES GARDE-CORPS EN BOIS 51
5.1. Description des essais 51
5.2. Essai 5-1 : Essai dynamique sur un montant de garde-corps en bois 51
5.3. Essai 5-2 : Essai dynamique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois 52
5.4. Essai 5-3 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps en bois 52
5.5. Essai 5-4 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps 53
5.6. Résultats 54
5.7. Résultats et observations sur les essais dynamiques de la série 5 54
5.7.1. Remarques 55

6. SÉRIE 6 : ESSAIS STATIQUES AVEC ÉTAIS MÉTALLIQUES COMME SUPPORTS 57
6.1. Description des essais 57
6.2. Essai 6-1 : Mesure de la force dans l'étai métallique selon le nombre de tours de serrage 59
6.3. Essai 6-2 : Détermination du coefficient de friction plaque d'appui-béton 60
6.4. Essai 6-3 : Essai statique sur un montant 61
6.5. Essai 6-4 : Essai statique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois 62
6.6. Essai 6-5 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps 63
6.7. Essai 6-6 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps 64
6.8. Résultats et observations sur les essais statiques de la série 6 65
6.8.1. Remarques 65

7. SÉRIE 7 : ESSAIS DYNAMIQUES AVEC LES ÉTAIS MÉTALLIQUES COMME SUPPORTS 67
7.1. Description des essais 67

7.2. Essai 7-1 : Essai dynamique sur un étai métallique 67
7.3. Essai 7-2 : Essai dynamique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois 68
7.4. Essai 7-3 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps 68
7.5. Essai 7-4 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps 69
7.6. Résultats et observations sur les essais dynamiques de la série 7 69
7.6.1. Remarques 71

8. SÉRIE 8 : ESSAIS DE BASCULEMENT AVEC LISSE FAITE DE DIFFÉRENTS MATÉRIAUX 73
8.1. Description des essais 73
8.2. Essai 8-1 : Essais de basculement avec une lisse supérieure de bois 73
8.3. Essai 8-2 : Essai de basculement avec une lisse supérieure flexible (câble de polypropylène) 74
8.4. Essai 8-3 : Essai de basculement avec une lisse supérieure faite d'un câble en acier de $^1/_2$ po 74
8.5. Résultats et observations sur les essais de basculement de la série 8 74
8.6. Remarques 75

9. COMPARAISON DES EXIGENCES DE RÉSISTANCE DES RÈGLEMENTS ET DES NORMES INTERNATIONAUX 77
9.1. Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec (S-2.1, r.6) - Cas de charge 1 78
9.1.1. Vérification du montant du garde-corps d'après CAN/CSA-086.1-M89 79
9.1.2. Exigences du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec (S-2.1, r.6) - Cas de charge 2 80
9.1.3. Vérification du montant 81
9.1.4. Vérification de la lisse supérieure 82
9.2. Exigences de résistance pour le Règlement sur la santé et la sécurité du travail du Québec (RSST) – Cas de charge 1 82
9.2.1. Sollicitations sur le montant 83
9.2.2. Sollicitations en travée 83
9.2.3. Vérification du montant d'après CAN/CSA-086.1-M89 83
9.3. Exigences de résistance pour le Règlement sur la santé et la sécurité du travail du Québec (RSST) – Cas de charge 2 84
9.3.1. Vérification du montant d'après CAN/CSA-086.1-M89 84
9.3.2. Vérification de la lisse supérieure 84
9.4. Exigences de résistance de OSHA 85
9.4.1. Vérification du montant d'après CAN/CSA-086.1-M89 – Cas de charge 1a) 85
9.4.2. Vérification du montant d'après CAN/CSA-086.1-M89 – Cas de charge 1b) 85
9.4.3. Vérification du montant d'après CAN/CSA-086.1-M89 - Cas de charge 2a) 85
9.4.4. Vérification de la lisse supérieure d'après CAN/CSA-086.1-M89 - Cas de charge 2a) 86
9.4.5. Vérification du montant d'après CAN/CSA-086.1-M89 - Cas de charge 2b) 86
9.4.6. Résultats et observations sur la comparaison des règlements et normes 87

10. CONCLUSIONS 89
10.1. Conformité au Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec S-2.1, r.6 89
10.1.1. Garde-corps en bois de type 89
10.1.2. Garde-corps avec étais métalliques comme supports 91
10.2. Comparaison des exigences de résistance 92
10.3. Critère de flèche 92
10.4. Application de la méthode aux chantiers 93

11. RECOMMANDATIONS 95

12. RÉFÉRENCES 97

Annexe A (A-1, A-2, A-3, A-4 et A-5) 101

ANNEXE B (B-1, B-2, B-3, B-4, B-5 ET B-6) 129

ANNEXE C 155

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Exigences de résistance....4
Tableau 2 : Exigences de construction....11
Tableau 3 : Critères de flèche....15
Tableau 4 : Instruments utilisés pour les essais....39
Tableau 5: Sommaire des résultats des essais statiques....46
Tableau 6 : Sommaire des résultats des essais dynamiques....54
Tableau 7 : Calibrage de l'étai....58
Tableau 8 : Résultats des essais de la série 6....66
Tableau 9 : Résultats des essais de la série 7....70
Tableau 10 : Sommaire des résultats de la série 8....75

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Ancrages des garde-corps en bois 17
Figure 2 : Ancrages coulés sur place pour les montants de garde-corps 18
Figure 3 : Essais statiques avec un effort de traction de 1 m/mm....19
Figure 4 : Mannequin anthropomorphe et son chemin de roulement et Système de garde-corps (extrait de Jacmin et Mayer, 1984) 20
Figure 5 : Garde-corps en bois avec gousset en contre-plaqué....21
Figure 6 : Garde-corps en bois avec jambe à 45^0 avec une cale 21
Figure 7 : Garde-corps en bois avec jambe à 45^0....22
Figure 8 : État métallique (extrait du CSAO) 23
Figure 9 : Garde-corps en bois près du vide sur une dalle de béton 27
Figure 10 : Garde-corps en bordure du vide sur la fausse charpente de coffrage....27
Figure 11 : Montants de garde-corps cloués sur un fond de clouage vertical....27
Figure 12 : Jambe en 2x4 pour solidifier le montant 27
Figure 13 : États métalliques utilisés comme fausse charpente de coffrage....29
Figure 14 : Plaque d'appui de contreplaqué percé au centre par un clou de 4 pouces....29
Figure 15 : Plaque d'appui de contreplaqué assemblée à la plaque d'appui de l'étai en glissant le clou de 4 pouces....29
Figure 16 : Cadre en treillis métallique comme garde-corps....29
Figure 17 : Clé pour serrer l'étai métallique 30
Figure 18 : Cadre en bois fait de 2 x 4....30
Figure 19 : Détermination de la force de serrage dans l'étai et du coefficient de frottement μ 33
Figure 20 : Fabrication de la dalle inférieure....35
Figure 21 : Fabrication des dalles supérieures....35
Figure 22 : Garde-corps de type 1....36
Figure 23 : Assemblage des montants des garde-corps de type 1 à la dalle inférieure....37
Figure 24 : Garde-corps de type 2....38
Figure 25 : Schéma des essais 4-1a, 4-1b et 4-1c 41
Figure 26 : Vues des essais 4-1a, 4-1b et 4-1c supp. 42
Figure 27 : Schéma de l'essai 4-2....43
Figure 28 : Photos illustrant la réalisation de l'essai 4-2....43
Figure 29 : Schéma de l'essai 4-3....44
Figure 30 : Essai d'une section de rive de la série 4-3 44
Figure 31 : Schéma de l'essai 4-4....45
Figure 32 : Photo illustrant l'essai 4-4 portant sur une section centrale 45
Figure 33 : Schéma de l'essai 5-1....51
Figure 34 : Schéma de l'essai 5-2....52
Figure 35 : Schéma de l'essai 5-3....53
Figure 36 : Schéma de l'essai 5-4....53
Figure 37 : Dimensions types d'un étai....57
Figure 38 : Calibrage d'un étai métallique avec la presse Amsler....58
Figure 39 : Courbe de calibrage de l'étai 59
Figure 40 : Réalisation des essais 6-1a, 6-1b et 6-1c sur un étai métallique 59

Figure 41 : Schéma de l'essai 6-2 60
Figure 42 : Mesure du coefficient de friction de l'étai sur la dalle pour l'essai 6-2 60
Figure 43 : Schéma de l'essai 6-3 61
Figure 44 : Essai statique sur un montant (essai 6-3) 61
Figure 45 : Essai statique sur un garde-corps en bois 62
Figure 46 : Garde-corps attaché aux étais avec un fil de fer no 16 62
Figure 47 : Essai statique de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps (essai 6-5) 63
Figure 48 : Essai statique de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps (essai 6-6) 64
Figure 49 : Chevauchement des sections de garde-corps (essai 6-6) 64
Figure 50 : Schéma de l'essai 7-1 67
Figure 51 : Schéma de l'essai 7-2 68
Figure 52 : Schéma de l'essai 7-3 69
Figure 53 : Schéma de l'essai 7-4 69
Figure 54 : Sollicitations au montant 78

1. INTRODUCTION - PROBLÉMATIQUE DE SANTÉ ET SÉCURITÉ DU TRAVAIL

Les accidents de chute de hauteur sont une des causes principales des accidents graves et mortels au travail (Kisner & Fosbroke, 1994). Les statistiques du Bureau du travail montrent qu'en 1994, environ 10 % des 5 923 décès survenus au travail dans l'industrie privée (private industry) sont dus à des accidents de chute (US Bureau of labor Statistics, 1996). Dans le domaine de la construction, les accidents de chute sont la cause principale des accidents graves et mortels (Surada, Fosbroke, & Braddee, 1995; Kisner & Fosbroke, 1994; Cattleledge, Hendricks & Stanevich, 1996). L'analyse de 3 496 décès survenus dans l'industrie de la construction aux États-Unis entre 1985-1989 par l'Occupational Safety and Health Administration (OSHA) montre que 33 % de ces décès sont dus à des accidents de chute de hauteur (OSHA, 1990). Les statistiques de la Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec (CSST) compilées par le Service d'expertise et soutien statistique (SESS) de l'Institut de recherche Robert Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) montrent que 19 % des 24 999 lésions survenues dans le secteur de la construction entre 1995-1998, soit 4 676 lésions, sont dues à des accidents de chute de hauteur. Pour les 24 999 lésions, le déboursé total est 234 600 515 $; le nombre de jours perdus est 2 415 475 jours. Pour les 4 676 lésions dues aux accidents de chutes de hauteur, le déboursé est 65 320 224 $, soit 28 % du déboursé total. Le nombre de jours perdus est 653 985, soit 27 % des jours perdus (SESS, 1999).

Le travail en hauteur comporte des risques importants de chute contre lesquels il faut protéger les travailleurs. En 1998, le taux moyen de cotisation à la CSST était environ 2,50 $, alors que le taux moyen des entreprises œuvrant dans le travail en hauteur, par exemple la charpente métallique, avoisinait les 30 $. Ce taux élevé illustre bien l'incidence des accidents graves et mortels dans les travaux en hauteur. Les réglementations québécoise et internationale sont très explicites; il faut protéger les travailleurs exposés à un risque de chute de 1.8 mètre ou plus. La stratégie de la prévention de chute de l'Organisme professionnel de prévention du bâtiment et des travaux publics (OPPBTP, 1984) vise d'abord à empêcher la chute en éliminant les risques à la source, en prévoyant le maximum d'opérations au sol ou en protégeant par l'ouvrage, ou en mettant en place des protections collectives sur le plan du travail. Si l'élimination à la source n'est pas possible, il faut limiter la chute par des protections collectives constituées par des surfaces de recueil; sinon, il faut protéger individuellement le travailleur en utilisant un équipement individuel de protection contre les chutes de hauteur.

Pour les planchers (en béton ou pontage métallique), le garde-corps est le moyen le plus approprié pour protéger les travailleurs contre les risques de chute. Il constitue une excellente protection collective. La fonction première d'un garde-corps est de prévenir la chute. Conséquemment, les forces mises en jeu avec le garde-corps sont des forces statiques et sont de l'ordre de grandeur du poids du travailleur. Habituellement, les garde-corps en bois sont fabriqués et installés à pied d'œuvre sur la fausse charpente lors du montage du coffrage de la dalle. La fausse charpente et les garde-corps sont enlevés en même temps aussitôt que le béton ait fait sa prise, soit environ 3 à 4 jours après la coulée du béton. Par la suite, il faut installer à nouveau les garde-corps pour assurer la protection des travailleurs qui effectuent les travaux de finition sur le plancher. La présence des garde-corps dispense le travailleur du port du harnais et évite la pose des ancrages pour les longes du travailleur. La pose des ancrages ayant une

résistance à la rupture de 18 kN (S-2.1, r.6, 2001) est toujours problématique, surtout sur les ouvrages temporaires.

Sur le plancher, les tâches à réaliser exigent beaucoup de mobilité et de déplacements rapides. Ceci exclut l'utilisation des moyens de protection par limitation de déplacement. Beaucoup de tâches sont réalisées en marchant en reculons et en déplacement rapide. Ceci favorise les risques de chute par trébuchement sur les émergences et les obstacles (l'outillage diverse, les matériaux emmagasinés etc.) présents sur la surface de travail. De plus, en se concentrant sur la tâche à exécuter, ou en se déplaçant rapidement sur la surface du travail, les travailleurs se rendent rapidement au bord du vide et en l'absence de moyen de protection, ils s'exposent à des sérieux risques de chute.

Les articles 3.8.2 et 3.8.3 du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec (S-2.1, r.6, 2001) donnent les exigences de résistance et de construction d'un garde-corps, mais aucune indication sur comment faire pour réaliser ces exigences. Les inspecteurs de la CSST se fient principalement à ces articles pour déterminer si les garde-corps sont conformes au Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec. Cependant, lors de leurs visites aux chantiers, les inspecteurs disent qu'il est difficile pour eux de vérifier si les garde-corps fabriqués et installés à pied d'œuvre sur les chantiers sont sécuritaires et conformes au Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec. La particularité et la variabilité de chaque chantier rendent aussi leur tâche extrêmement difficile.

Suite à une demande de la Direction régionale de la CSST de Laval, cette étude a été effectuée afin de développer une méthode et un protocole d'essais qui permettront au milieu de la construction de vérifier si les garde-corps fabriqués et installés à pied d'œuvre sur les chantiers de construction sont sécuritaires et conformes aux exigences du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec. Cette étude visait aussi à déterminer les méthodes d'installation et de fixation des ancrages desdits garde-corps qui permettent de rencontrer les exigences de résistance des articles 3.8.2 et 3.8.3 du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec.

1.1. État des connaissances scientifiques ou techniques sur le sujet

1.1.1. Normes et règlements

Nous avons recensé dans la revue de littérature beaucoup d'études ponctuelles réalisées sur les garde-corps afin de répondre à une problématique particulière. Ces études ont été publiées sous forme de mémos ou fiches pratiques. Les connaissances scientifiques ou techniques sur les garde-corps s'articulent principalement autour des normes et règlements qui ont été publiés par les organismes de normalisation. Ces documents fournissent un ensemble de règles de base à respecter sans donner des indications sur comment et quoi faire pour respecter ces règles de base. Ils constituent des outils efficaces et nécessaires, mais comme tout outil, ils comportent également certaines limites soulignées particulièrement par Kahn, Lantier (Kahn et Lantier, 1985) et Toulouse (Toulouse, 1986).

1.1.2. Les exigences des normes et règlements

Exigences de résistance

L'ensemble des normes et règlements donnent les exigences de construction et les exigences de résistance des garde-corps. Le Tableau 1 donne les exigences de résistance des principaux documents consultés. Pour vérifier si un ouvrage est conforme aux exigences d'un Code ou d'une norme, il suffit de vérifier que cet ouvrage respecte l'ensemble des exigences du Code ou de la norme. Ainsi, pour vérifier si les garde-corps en bois fabriqués et montés à pied d'œuvre sur les chantiers et les garde-corps faits de cadres métalliques attachés avec des broches à des étais métalliques comme supports, sont conformes aux exigences du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec, il suffit de vérifier que ces garde-corps respectent les exigences de ce code. Pour ce faire, nous vérifions en premier lieu les dispositions constructives. Si celles-ci sont vérifiées, nous réalisons par la suite les essais de résistance en appliquant les forces horizontale et verticale de 900 N et 450 N en n'importe quel point de la lisse supérieure telles que stipulées par l'article 3.8.2 du Code. Si les garde-corps respectent les exigences de construction et les exigences de résistance du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec, ils seront conformes à ce code.

Comme le montre le tableau 1, les exigences de résistance diffèrent d'un document à l'autre. Les deux principaux règlements en vigueur au Québec, soit le Code de sécurité pour les travaux de construction (S-2.1, r.6), le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST, 2001) donnent des exigences de résistance différentes qui s'adressent à la particularité de leurs applications. Notons au passage que le Règlement sur les établissements industriels et commerciaux S-2.1, r.9 et le Règlement sur la qualité du milieu du travail S-2.1, r.15 ont été abrogés dernièrement et remplacés par le RSST. Un travailleur dont la chute est arrêtée par un garde-corps met en jeu les mêmes mécanismes d'arrêt de chute quel que soit son lieu de chute en Europe, aux États-Unis et au Québec. Dès lors, la question qui se pose est la suivante : quel règlement ou norme devons-nous utiliser pour tester la résistance d'un garde-corps et quel(s) règlement(s) ou norme(s) reflète(nt) la réalité? Les différences d'un document à l'autre sont majeures, alors que les mécanismes d'arrêt de chute par un garde-corps sont les mêmes universellement. Peut-être qu'aucun règlement ou norme à lui seul reflète la réalité ou alors, une enveloppe synthèse des exigences de résistance répondrait peut-être à cette question.

Tableau 1 : Exigences de résistance

Documents de références	Exigences de résistance
1) S-2.1, r.6. Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec (Dernière modification : 2 août 2001, à jour au 18 septembre 2001)(S-2.1, r.6, 2001).	Article 3.8.2. Résistance: 1) Un garde-corps doit être conçu pour: a) Résister à une force horizontale concentrée de 900 Newtons appliquée à n'importe quel point de la lisse supérieure; et b) Résister à une force verticale concentrée de 450 Newtons appliquée à n'importe quel point de la lisse supérieure.
2) S-2.1, r.9. Règlement sur les établissements industriels et commerciaux (Dernière modification : 2 août 2001, à jour au 26 février 2002)(S-2.1, r.9, 1997). **Ce règlement est maintenant abrogé**.	Article 3.11.1 : Tout garde-corps doit être conçu, construit et installé de façon à résister aux charges minimales suivantes : Une charge ponctuelle horizontale de 550 newtons appliquée en un point quelconque de la lisse supérieure; B) Une charge verticale de 1,5 kilonewton par mètre linéaire, appliquée à la lisse supérieure.
3) RQMT – Règlement sur la qualité du milieu du travail. Projet de règlement sur la qualité du milieu de travail, le 16 septembre 1998. (RQMT, 1998). **Ce règlement est maintenant abrogé**.	Garde-corps : tout garde-corps doit être conçu, construit et installé de façon à résister aux charges minimales suivantes : 1° une charge ponctuelle horizontale de 900 newtons appliquée en un point quelconque de la lisse supérieure; 2° une charge verticale de 1,5 kilonewton, par mètre linéaire, appliquée à la lisse supérieure.
4) RSST. Règlement sur la santé et la sécurité du travail – Décret 885-2001 (RSST, 2001)	Article 12 : Tout garde-corps incorporé à un bâtiment, à l'exception de celui dont est muni un équipement doit être conforme au Code national du bâtiment tel qu'il se lit au moment de son installation. Les autres garde-corps doivent être conçus, construits et installés de façon à résister aux charges minimales suivantes : **a)** une charge ponctuelle horizontale de 0,55 kilonewtons appliquée en un point quelconque de la lisse supérieure; b) une charge verticale de 1,5 kilonewton par mètre linéaire, appliquée à la lisse supérieure.
5) Occupational Health and Safety Regulation of British Columbia, WCB of BC, 2004	Subsection 4.58 Specifications for guards and guardrails (3) Unless otherwise permitted by subsection (4), guardrails must be installed to withstand a load applied horizontally and normal to the span of the rail, of 550 N (125 lb) applied at any point along the rail, and a vertical, download of 1.5 kN per m (100 lbs per ft) along the top rail, but the horizontal and vertical loads need not be considered to act simultaneously.

Documents de références	Exigences de résistance
	(4) Guardrails temporarily installed during the construction, demolition or renovation of a work area must : (a) be able withstand a load of 550 N (125 lbs) applied perpendicularly to the span in a horizontal or vertically downward direction at any point on the top rail, or be built to the criteria of subsection (5).
6) Workplace Safety and Health Act of Manitoba, 2004	The guard railing must be capable of resisting a static load of 900 Newtons at any point along the rails.
7) Occupational Health and Safety Act and Regulations for Construction Projects of Ontario, June 2000.	Section 26.3 (5) A guardrail system shall be capable of resisting anywhere along the length of the system the following loads when applied separately, without exceeding the allowable unit stress for each material used : 1. A point load of 675 newtons applied in a lateral direction to the top rail. 2. A point load of 450 newtons applied in a vertical downward direction to the top rail. 3. A point load of 450 newtons applied in a lateral or vertical downward direction to the intermediate rail, or midway between the top rail and the toe board. 4. A point load of 225 newtons applied in a lateral direction to the toe board.
8) ASTM E 985-87. Standard Specification for Permanent Metal Railing Systems and Rails for Buildings	6.1.1 The minimum concentrated test load to be applied non-concurrently at any point of the top rail of the installed railing system in any buildings, except those referenced in 6.1.2 and 6.1.3, shall be 900 N (200 lbf) in the horizontal and vertical downward direction.
9) ANSI A 12.1-1973 – Safety Requirements for Floors and Wall Openings, Railings, and Toeboards	7.3 Minimum requirements for guard railings are as specified in the following subsections : 7.3.1 The anchorage of posts and framing members for railings of all types of members shall be designed using standard engineering practices for stresses, safety factors, etc. The completed railing shall be designed and constructed to withstand a load of 25 pounds per linear foot applied in any direction at the top of the railing. The intermediate rail shall be capable of withstanding a horizontal load of 20 pounds per linear foot. The end of terminal posts shall be capable of withstanding a load of 200 pounds applied in any direction. The above loads are not additive.
10) British Standard Code of Practice for Protective barriers in and about buildings, 1982	Dépend de l'usage du garde-corps.
11) ANSI A 10.18-1983 – Safety Requirements for Temporary Floor and Wall Openings, Flat Roofs, Stairs, Railings, and Toe	7.1.2 The anchoring of posts and framing of members for railings shall be of such construction that the completed structure shall be capable of withstanding a load of at least 200 lb applied in any direction at any point on the top rail. Where railings are likely to receive heavy stresses from

Documents de références	Exigences de résistance
boards for Construction.	crowds, trucking, or handling of materials, additional strength should be provided by use of heavier stock or closer spacing of posts, or both.
12) OSHA (Occupational Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor) - 1926.502 Fall protection systems criteria and practices, subpart M	Article 1926.502(b)(3) : Guardrails systems shall be capable of withstanding, without failure, a force of at least 200 pounds (890 N) applied within 2 inches (5.1 cm) of the top edge, in any outward or downward direction, at any point along the top edge.
13) NF P 93-340 - « Garde-corps métallique provisoire de chantier (GCMPC) »	Il s'agit de deux essais qui éprouvent simultanément les lisses, leurs fixations et les montants de garde-corps. Un garde-corps métallique préfabriqué quelle que soit sa portée doit résister séparément à : a) Une charge ponctuelle de 300 N sans flèche élastique supérieure à 35 mm; et, b) Une charge ponctuelle de 1 250 N sans rupture ou désassemblage et sans engendrer un déplacement en tout point de plus de 200 mm par rapport à la position initiale. Les deux charges ci-dessus doivent être appliquées séparément dans la position la plus défavorable horizontalement ou sous un angle quelconque vers le bas. Pour les garde-corps à lisses en bois, les règles sont les mêmes que précédemment en ce qui concerne les montants métalliques. Par contre, les lisses en bois doivent résister à des efforts nominaux plus importants. En effet, le bois n'ayant pas de limite élastique, sa limite de résistance est vérifiée à la rupture, valeur qui varie notamment en fonction de son degré d'humidité.
14) NF E 85 – 10-1 – Garde-corps métalliques, 1983.	Les choix des matériaux, du dimensionnement et du mode de réalisation doivent être tells qu'ils permettent aux éléments constitutifs du garde-corps de résister aux forces suivantes appliquées à la main courante : - une force horizontale uniformément répartie de 600 N par mètre de garde-corps. - une force verticale concentrée en un point quelconque de 1000 N.
15) Code National du bâtiment du Canada CNBC	Article 4.1.10.1. Garde-corps 1) La charge spécifiée minimale appliquée horizontalement, vers l'extérieur ou l'intérieur, à la partie supérieure d'un garde-corps exigé est de : a) 3,0 kN au sommet pour les moyens d'évacuation des tribunes, des stades, des bancs-gradins et des arénas; b) 1,0 kN concentré à n'importe quel point du garde-corps des passerelles d'accès aux plates-formes d'équipement, des escaliers contigus et les autres endroits similaires où il est peu probable que des personnes se rassemblent en grand nombre; et c) 0.75 kN/m ou 1,0 kN concentré à n'importe quel point du garde-corps, selon le cas qui

Documents de références	Exigences de résistance
	s'applique aux endroits que ceux décrits aux alinéas a) et b). 2) Les éléments constitutifs des garde-corps, y compris les panneaux pleins et les poteaux, doivent être conçus pour résister à une charge concentrée de 0,5 kN s'exerçant à n'importe quel point de l'élément. 3) Il n'est pas obligatoire de considérer que les charges mentionnées au paragraphe 2) agissent en même temps que celles qui sont mentionnées aux paragraphes 1) et 4). 4) La charge spécifiée minimale appliquée verticalement à la partie supérieure de tout garde-corps exigé est de 1,5 kN/m et il n'est pas obligatoire de considérer que cette charge agit en même temps que celle mentionnée au paragraphe 1).

Exigences de construction

Le tableau 2 donne les exigences de construction des principaux documents qui sont essentiellement les mêmes dans les documents consultés.

1.1.3. Critères de flèche

Si la déformation de la lisse supérieure après application des charges est excessive, il y a un risque que le travailleur basculera dans le vide par-dessus la lisse supérieure. Il faut donc limiter sa déformation en introduisant un critère de flèche. Seuls trois documents au tableau 3 donnent les critères de flèche. L'article 1926.502(b)(4) d'OSHA (OSHA, 1998) stipule «*when the 200 pound (890 N) test load specified in paragraph (b)(3) of this section is applied in a downward direction, the top edge of the guardrail shall not deflect to a height less than 39 inches (1.0 m) above the walking/working level*». AFNOR NF P 93-340 définit la flèche élastique à 35 mm avec la charge ponctuelle de 300 N et à 200 mm avec la charge ponctuelle de 1 250 N. L'article 7.3.2 de ANSI A 12.1-1973 stipule «*Where the top rail or intermediate rail of a guard railing is constructed of a flexible material such as rope, chain, or cable, the maximum span between supports shall be 8 feet and the maximum deflection shall not exceed 3 inches under a load specified in article 7.3.1*». Les deux règlements du Québec, soit le Code de sécurité pour les travaux de construction (S-2.1, r.6) et le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST, 2001) ne donnent pas de critère de flèche. Il y a lieu de se questionner si un critère de flèche ne devrait pas être intégré aux règlements du Québec au même titre que les exigences de résistance et de construction. Un bon garde-corps doit non seulement résister aux charges appliquées, mais il doit aussi retenir le travailleur pour éviter qu'il bascule dans le vide. De plus en plus, les organismes internationaux reconnaissent l'importance d'un critère de flèche et ils l'intègrent progressivement dans leurs documents.

La flèche dépend de la nature de la lisse supérieure. Dans les essais de Jacmin et Meyer (Jacmin et Mayer, 1984) avec un mannequin de 80 kg avec une ralingue, le seuil de basculement du mannequin, lorsque la ralingue est détendue, correspond à une flèche de 0,35/0,40 m, soit à une hauteur de 0,80 à 0,85 par rapport au pied du mobile. Dans le cadre d'une campagne d'essais interne à l'IRSST, nous avons testé un garde-corps avec une lisse supérieure faite d'une tige d'un pouce de diamètre utilisée comme contreventement dans les échafaudages. Lors de cet essai, la lisse supérieure a résisté aux charges appliquées sans rupture. Le garde-corps a donc réussi l'essai statique avec les charges de 900 N horizontale et 450 N verticale telles que stipulées par le Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec. Par contre, la déformation de la lisse supérieure était tellement importante que manifestement elle ne retiendrait pas le travailleur lors de l'arrêt d'une chute. Cet exemple illustre un garde-corps conforme aux exigences de résistance du Code de sécurité pour les travaux de construction, mais non sécuritaire.

1.1.4. Efficacité, fiabilité et convivialité d'un garde-corps

Un bon garde-corps est conforme aux normes ou règlements en vigueur. Il remplit bien sa fonction de protection collective s'il est efficace, fiable, et convivial (Arteau et Giguère, 1991, 1993). L'efficacité est la facilité avec laquelle les travailleurs œuvrent sur la dalle en la présence du garde-corps. Celui-ci, posé en périmètre de la dalle, n'interfère pas avec les activités du travailleur sur la dalle; il est donc efficace. La fiabilité est réalisée si le garde-corps remplit les fonctions pour lesquelles il a été conçu. En premier lieu, le garde-corps doit résister aux sollicitations pour lesquelles il a été conçu, c'est-à-dire, résister aux forces mises en jeu lors de l'arrêt de la chute sans rupture ou amorce de rupture et sans abandon de la charge avec une déformation admissible. Pour être fiable, le garde-corps doit non seulement arrêter la chute, il doit retenir le travailleur pour éviter qu'il bascule dans le vide par-dessus la lisse supérieure.

Tableau 2 : Exigences de construction

Documents de références	Exigences de construction
1) S-2.1, r.6. Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec (Dernière modification : 2 août 2001, à jour au 18 septembre 2001)(S-2.1, r.6, 2001).	Article 3.8.3. Construction : 1) Tout garde-corps doit avoir une hauteur qui varie entre 1 m et 1,2 mètre au-dessus de l'aire où le travailleur se trouve. 2) Un garde-corps en bois doit être constitué d'une : a) lisse supérieure d'une épaisseur minimale de 40 millimètres sur une largeur de 90 millimètres appuyée sur des montants de même dimension espacés d'au plus 1,8 mètre placés de telle façon que la largeur de 90 millimètres du montant soit dans l'axe de la largeur de la lisse supérieure; b) traverse intermédiaire d'au moins 75 millimètres de large à mi-hauteur et fixée solidement à l'intérieur des montants; et c) plinthe d'au moins 90 millimètres de hauteur et fixée solidement à l'intérieur des montants.
2) S-2.1, r.9. Règlement sur les établissements industriels et commerciaux (Dernière modification : 2 août 2001, à jour au 26 février 2002)(S-2.1, r.9, 1997). **Ce règlement est maintenant abrogé.**	Article 3.11.2 : Tout garde-corps doit posséder une lisse supérieure située entre 900 millimètres et 1 100 millimètres du plancher et une lisse intermédiaire fixée à la mi-distance entre la lisse supérieure et le plancher.
3) RQMT – Règlement sur la qualité du milieu du travail. Projet de règlement sur la qualité du milieu de travail, le 16 septembre 1998. (RQMT, 1998). **Ce règlement est maintenant abrogé.**	Lisses : tout garde-corps doit posséder une lisse supérieure située entre 900 millimètres et 1 100 millimètres du plancher et une lisse intermédiaire fixée à la mi-distance entre la lisse supérieure et le plancher. Plinthe : lorsqu'il y a danger de chute d'objets pouvant causer des blessures, les garde-corps doivent également posséder une plinthe au niveau du plancher d'au moins 100 millimètres de hauteur.
4) RSST. Règlement sur la santé et la sécurité du travail – Décret 885-2001 (RSST, 2001)	Article 12 De plus, de tels garde-corps doivent posséder une lisse supérieure située entre 900 et 1 100 millimètres du plancher et au moins une lisse intermédiaire fixée à la mi-distance entre la lisse supérieure et le plancher. La lisse intermédiaire peut être remplacée par des balustres ou des panneaux. Article 13. Plinthe : Lorsqu'il y a danger de chute d'objets pouvant causer des blessures, les garde-corps doivent également posséder une plinthe au niveau du plancher d'au moins 100 millimètres de hauteur.

Documents de références	Exigences de construction
5) Occupational Health and Safety Regulation of British Columbia, WCB of BC, 2004	Guardrail means a guard consisting of a top rail 102 cm to 112 cm (40 in to 44 in) above the work surface, and an intermediate rail located approximately midway between the underside of the top rail and the top of the toeboard, if one is provided, or the work surface if no toeboard is provided. 4.58 Specifications for guards and guardrail (5) Unless designed by a professional engineer, temporary wooden guardrails on floors and platforms must meet the following criteria : (a) posts must be spaced not more than 2.4 m (8 ft) apart, except a scaffold may have posts spaced not more than 3 m (10 ft) apart; (b) wooden top rails must be at least 38 mm x 89 mm (2 in x 4 in nominal) lumber for a span of up to 2.4 m between supports, and at least 38 mm x 140 mm (2 in x 6 in nominal) lumber for a spsn of 2.4 m to 3 m between supports; (c) wooden midrails must be 19 mm x 140 mm (1 in x 6 in nominal) or 38 mm x 89 mm (2 in x 4 in nominal) lumber' (d) wooden rails must be secured to the tops or inner sides of their vertical supports; (e) wooden guardrail posts must be at least 38 mm x 89 mm (2in x 4 in nominal) lumber, and must be installed with the narrow dimension facing the open edge;
6) Workplace Safety and Health Act of Manitoba, 2004	Guardrailing consists of a top rail at a height of between 900 mm and 1060 mm (36 to 42 inches) above the working surface with an intermediate rail between the top rail and bottom level. Where there is danger of materials or objects falling from the work surface to a working level below, a toeboard 125 mm (5 inches) in height is required to be secured to the guardrail posts. Guardrails posts must be securely attached to the base and braced where necessary to remain solid and secure. Posts are not to exceed a maximum spacing of 2.5 metres (8 feet) apart.
7) Occupational Health and Safety Act and Regulations for Construction Projects of Ontario, June 2000.	26.3 (4) Wooden guardrails : 1. It shall have a top rail, an intermediate rail and a toe board. 2. The intermediate rail may be replaced by material that can withstand a point load of 450 newtons applied in a lateral or vertical downward direction. 3. The top of the guardrail system shall be located at least 0.9 metres but not more than 1.1 metres above the surface on which the system is installed. 4. The toe board shall extend from the surface to which the guardrail system is attached to a height at least 100 millimetres or, if the toe board is made of wood, at least 89 millimetres. 5. If the guardrail system is located at the perimeter of a work surface, the distance between the edge of the surface and the guardrail system shall not be greater than 300 millimetres.

Documents de références	Exigences de construction
	26.3 (7) The following additional requirements apply to a guardrail system that is made of wood : 1. The wood shall be spruce, pine or fir (S-P-F) timber of construction grade quality or better. 2. The wood shall be free of sharp objects such as splinters and protruding nails. 3. The system shall have posts that are at least 38 millimetres by 89 millimetres, are securely fastened to the surface and are spaced at intervals of not more than 2.4 metres. 4. The top rail the intermediate rail shall each be at least 38 millimetres by 89 millimetres.
8) ASTM E 985-87. Standard Specification for Permanent Metal Railing Systems and Rails for Buildings	5. Design Requirements 5.1. Railing height 5.1.1. Guardrail Systems 5.1.1.1.The fabricated height of a guardrail system, measured from its top surface to the finished floor level, shall be at least 1.05 m (42 in). When variations in the evenness of the finished floor will result in individual height measurements of the installed guardrail system to be less than 1.02 m (41 in.), the fabricated height of the guardrail system shall be increased accordingly. 5.2 Railing System Penetration 5.2.1 The various members of the railing system shall be arranged so that a sphere, 140 mm (5½ in.) in diameter, cannot be passed through the system. The members should be arranged to avoid climbing. 5.2.3 Toe boards shall be provided in areas where tools and other objects could be dislodged and fall on occupants below. The top of the toe board shall not be less 100 mm (4 in.) and the bottom not more than 13 mm (½ in.) above the average finished level at the line of the vertical supports of the railing system.
9) ANSI A 12.1-1973 – Safety Requirements for Floors and Wall Openings, Railings, and Toeboards	Article 7.1 : A guardrail shall consist of top rail, intermediate rail or equivalent protection, and posts, and shall have a vertical height within the range of 36 inches to 42 inches nominal from upper surface of top rail to floor, platform, runway, or ramp level. The top rail shall be smooth-surfaced throughout the length of the railing. The intermediate rail shall be approximately halfway between the top rail and the floor, platform, runway, or ramp. The ends of the rails shall not overhang the terminal posts, except where such overhang does not constitute a projection hazard.
10) British Standard Code of Practice for Protective barriers in and about buildings, 1982	Dépend de l'usage du garde-corps.
11) ANSI A 10.18-1983 – Safety	7. Standard Construction Specifications for Guardrails and Handrails

Documents de références	Exigences de construction
Requirements for Temporary Floor and Wall Openings, Flat Roofs, Stairs, Railings, and Toeboards for Construction.	7.1 Standard Railing . A standard railing (for construction) shall consist of top rail, intermediate rail, and posts. The completed structure shall meet the requirements given in 7.1.1 through 7.1.5. 7.1.1 The railing shall have a top rail that is not less than 36 in or more than 42 in. in higher than the floor platform, runway, or ramp level. A standard railing should include a toeboard. See 8.1.
12) OSHA (Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor) - 1926.502 Fall protection systems criteria and practices, subpart M	Article 1926.502(b)(1) : Top edge height of top rails, or equivalent guardrails systems, shall be 42 inches (1.1 m) plus or minus (8 cm) above the walking/working level. When conditions warrant, the height of the top edge may exceed the 45-inch height, provided the guardrail system meets all other criteria of this paragraph.
13) NF P 93-340 - « Garde-corps métallique provisoire de chantier (GCMPC) »	Les montants doivent être équipés de supports permettant la fixation efficace de deux lisses et d'une plinthe. Les règles à respecter sont les suivantes : - la plinthe doit avoir 0,15 m de hauteur et être pratiquement appuyée sur le sol; - la sous-lisse doit être à 0,45 m au-dessus du sol; - la lisse supérieure doit être à 1,00 m au-dessus du sol.
14) NF E 85 – 101 – Garde-corps métalliques, 1983.	(1) La hauteur du garde-corps doit être au moins égale à 1100 mm. Lorsque cette valeur est supérieure à 100 mm, deux lisses intermédiaires sont nécessaires. (2) Lorsque 2 lisses intermédiaires sont utilisées, elle doivent être situées respectivement à 450 mm et 750 mm du niveau plancher. (3) Lorsque le garde-corps surplombe un niveau de circulation, le dessous de la plinthe doit être entre 5 à 10 mm du plancher. Les montants sont espacés à une portée de 1500 mm maximum.
15) Code National du bâtiment du Canada CNBC	Dépend de l'usage du garde-corps : voir articles 3.3.1.17, 3.3.2.2, 3.4.6.5 et 9.8.8.2

Tableau 3 : Critères de flèche

Documents de références	Critères de flèche
1) S-2.1, r.6. Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec (Dernière modification : 2 août 2001, à jour au 18 septembre 2001)(S-2.1, r.6, 2001).	Néant
2) S-2.1, r.9. Règlement sur les établissements industriels et commerciaux (Dernière modification : 2 août 2001, à jour au 26 février 2002)(S-2.1, r.9, 1997). **Ce règlement est maintenant abrogé**	Néant
3) RQMT – Règlement sur la qualité du milieu du travail. Projet de règlement sur la qualité du milieu de travail, le 16 septembre 1998. (RQMT, 1998). **Ce règlement est maintenant abrogé**	Néant
4) RSST. Règlement sur la santé et la sécurité du travail – Décret 885-2001 (RSST, 2001)	Néant
5) Occupational Health and Safety Regulation of British Columbia, WCB of BC, 2004	Néant
6) Workplace Safety and Health Act of Manitoba, 2004	Néant
7) Occupational Health and Safety Act and Regulations for Construction Projects of Ontario, June 2000.	?
8) ASTM E 985-87. Standard Specification for Permanent Metal Railing Systems and Rails for Buildings	?

9) ANSI A 12.1-1973 - – Safety Requirements for Floors and Wall Openings, Railings, and Toeboards	Article 7.3.2 : Where the top rail or intermediate rail of a guard railing is constructed of a flexible material such as rope, chain, or cable, the maximum span between supports shall be 8 feet and the maximum deflection shall not exceed 3 inches under a load specified in article 7.3.1.
10) British Standard Code of Practice for Protective barriers in and about buildings, 1982	?
11) ANSI A 10.18-1983 – Safety Requirements for Temporary Floor and Wall Openings, Flat Roofs, Stairs, Railings, and Toeboards for Construction.	?
12) OSHA (Occupational Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor) - 1926.502 Fall protection systems criteria and practices, subpart M	Article 1926.502(b)(4) : When the 200 pounds (890 N) test load specified in paragraph (b)(3) of this section is applied in a downward direction, the top edge of the guardrail shall not deflect to a height less than 39 inches (1.0 m) above the walking/working level. Guardrail system components selected and constructed in accordance with appendix B to subpart M of this part will be deemed to meet this requirement.
13) NF P 93-340 - « Garde-corps métallique provisoire de chantier (GCMPC) »	Un garde-corps métallique préfabriqué quelle que soit sa portée doit résister séparément à : c) Une charge ponctuelle de 300 N sans flèche élastique supérieure à 35 mm; et, d) une charge ponctuelle de 1 250 N sans rupture ou désassemblage et sans engendrer un déplacement en tout point de plus de 200 mm par rapport à la position initiale. Les deux charges ci-dessus doivent être appliquées séparément dans la position la plus défavorable horizontalement ou sous un angle quelconque vers le bas (valide pour les garde-corps à lisses en bois).
14) NF E 85 – 101 – Garde-corps métalliques, 1983.	?
15) Code National du bâtiment du Canada CNBC	?

1.1.5. Les ancrages

Les ancrages font partie implicitement des exigences de résistance. Sur une charpente en bois, l'assemblage est fait par clouage. Par contre, sur une charpente en béton, l'assemblage du garde-corps à la charpente de béton peut être difficile à réaliser. Plusieurs documents et mémos pratiques donnent des exemples d'ancrages provisoires qui sont utilisés sur les chantiers. Les Figures 1a), 1b) et 1c), extraites du document Guardrail du Construction Safety Association of Ontario (CSAO, 1996) illustrent des ancrages types de garde-corps en bois. Sur un plancher en bois, la base (patte) en 2x4 est assemblée par clouage. Sur un plancher en béton, la base est assemblée à l'aide d'un pistolet de scellement ou par des ancrages expansifs forcés dans les trous percés dans la dalle suivant les instructions des manufacturiers ou à l'aide d'ancrages coulés dans la dalle.

a) b) c)

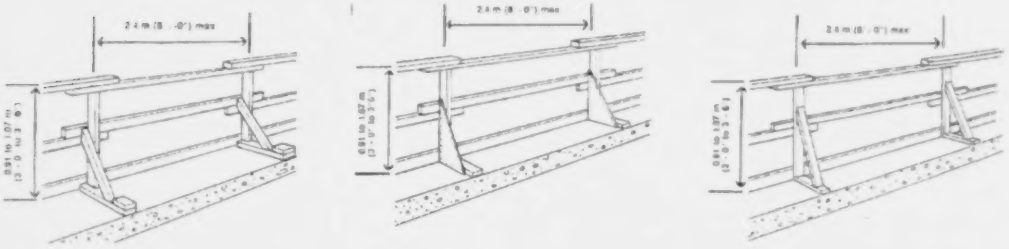


Figure 1 : Ancrages des garde-corps en bois

Le mémo-pratique B1 M01 94 de l'OPPBTP (OPPBTP, 1994) illustre trois types d'ancrages qui accueillent les montants de garde-corps. Dans l'ancrage Type A (Figure 2), le montant s'enfile dans un fourreau préalablement scellé dans la dalle ou éventuellement dans une réservation faite directement dans le béton. Dans l'ancrage Type B (Figure 2), le montant comporte, en pied, deux profilés parallèles et entretoisés qui permettent une fixation par ancrage dans la dalle (utilisation pour la pose notamment des éléments préfabriqués de façade et des garde-corps définitifs de balcons). Dans l'ancrage Type C (Figure 2), le montant comporte, en pied, une pince destinée au serrage en bord de dalle à l'aide d'une tige filetée. Les ancrages de type A et B conviennent bien pour les techniques de construction utilisées en France. Par contre, au Québec, la pose des ancrages lors de la coulée de béton n'est pas une pratique courante et répandue. L'ancrage de type C peut être utilisé, comme il se rapproche du type de garde-corps avec étais métalliques vus plus loin.

Les documents pratiques tels que le Construction Safety Association of Ontario (CSAO, 1996), le mémo pratique de l'OPPBTP et bien d'autres, donnent les paramètres d'ancrage, qui bien appliqués et exécutés sur des chantiers constituent des ancrages qui respectent les dispositions des règlements et normes en vigueur. Or, certains garde-corps fabriqués et installés à pied d'œuvre sur les chantiers relèvent plutôt de la débrouillardise.

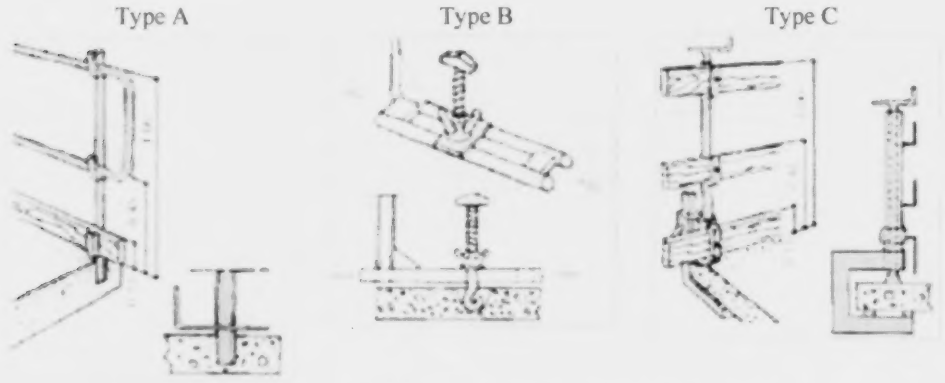


Figure 2 : Ancrages coulés sur place pour les montants de garde-corps

1.1.6. Les essais sur les garde-corps

Hormis quelques études réalisées sur des problématiques ponctuelles sur les garde-corps, nous avons recensé dans la littérature peu ou pas de méthodes d'essais permettant de vérifier si des garde-corps fabriqués et installés à pied d'œuvre sur les chantiers sont conformes au texte de lois en vigueur localement. Pour vérifier la conformité d'un garde-corps au Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec, il faut vérifier en premier lieu les exigences de construction de l'article 3.8.3. Si celles-ci sont satisfaites, en deuxième lieu, il faut vérifier les exigences de résistance de l'article 3.8.2 qui stipule que le garde-corps doit être conçu pour résister à *une force horizontale concentrée de 900 newtons et à une force verticale concentrée de 450 newtons appliquées à n'importe quel point de la lisse supérieure*. Ceci revient à tester le garde-corps pour les combinaisons de charges les plus critiques qui produisent les sollicitations et les déformations maximales dans les membrures du garde-corps. L'analyse structurale donne les cas de charge les plus critiques, entre autres :

1) Les forces horizontale de 900 N et verticale de 450 N agissent simultanément au droit d'un montant;
2) Les forces horizontale de 900 N et verticale de 450 N agissent simultanément à mi-portée de la lisse supérieure d'une section de garde-corps.
3) Les forces horizontale de 900 N et verticale de 450 N agissent simultanément à mi-portée de la lisse supérieure de la travée de rive d'une suite de trois sections de garde-corps.
4) Les forces horizontale de 900 N et verticale de 450 N agissent simultanément à mi-portée de la lisse supérieure de la travée centrale d'une suite de trois sections de garde-corps.

Les cas de charges 3 et 4 simulent un garde-corps à travées multiples installé sur le périmètre du plancher. Si le garde-corps réussit aux essais suivant les exigences des articles 3.8.2 et 3.8.3, il sera conforme au Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec.

1.1.7. Méthode d'essais de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS)

Pour vérifier un garde-corps utilisé par les étanchéistes lors des travaux de pose de revêtements sur toitures, l'INRS (Jacmin et Mayer, 1984) propose une méthode d'essai réalisée en collaboration avec les représentants de la Chambre syndicale nationale de l'Étanchéité. Le garde-corps est constitué de filets maintenus verticalement par des potelets de 1.20 m de hauteur. En l'absence de textes réglementaires et de normes, les représentants de la profession et l'INRS ont, d'un commun accord, défini comme niveau de performance minimale exigible la retenue d'une personne de 80 kg, animée d'une vitesse maximale de 2 m/s, chutant par trébuchement.

Le cahier des charges indique que le potelet doit résister à un moment de 60 kg.m sans déformation notable. La résistance des potelets a été vérifiée en réalisant deux séries essais. La première série d'essais statiques consistent à appliquer à une extrémité du potelet un effort de traction continu de 1 m/min avec l'autre extrémité ancrée (Figure 3). Les essais statiques permettent de présélectionner ou de vérifier les potelets. La deuxième série d'essais dynamiques consiste à vérifier la capacité du potelet seul à retenir un mannequin anthropomorphe de 80 kg frappant le garde-corps à une vitesse de 2 m/s (Figures 4A et B). Ces essais dynamiques visent à vérifier si les potelets peuvent résister au choc d'une personne heurtant dans sa chute le garde-corps.

L'efficacité du garde-corps est vérifiée par des essais de basculement avec le mannequin de 80 kg frappant la ralingue (lisse supérieure) du système de garde-corps avec et sans filet de protection. Les résultats montrent que le seuil de basculement du mannequin, lorsque la ralingue est détendue, correspond à une flèche de 0,35/0,40 m, soit une hauteur de 0,80 à 0,85 m par rapport au pied du mobile. En résumé, il appert que l'étude de l'INRS constitue une base de travail intéressante à l'élaboration d'un protocole d'essai ou d'un texte réglementaire sur les garde-corps.

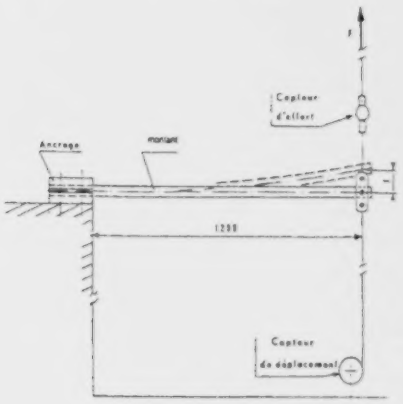
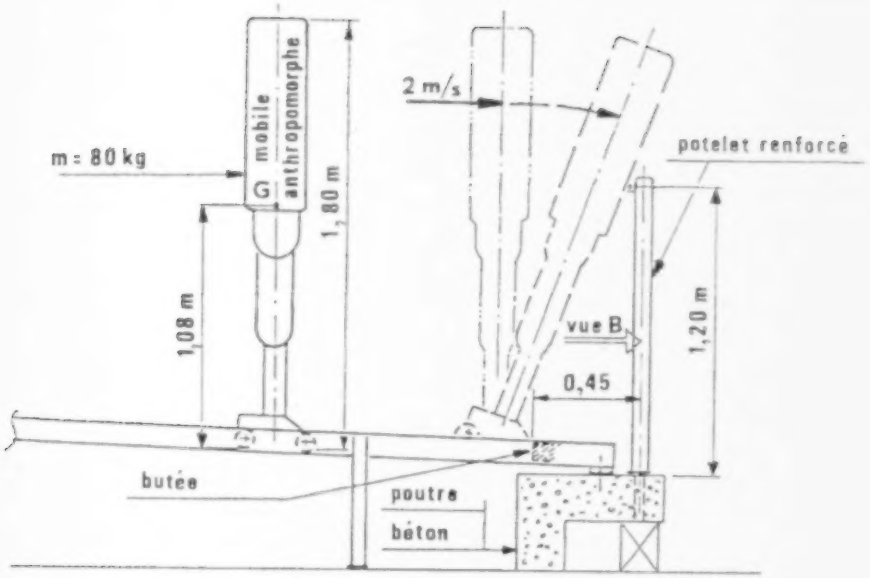
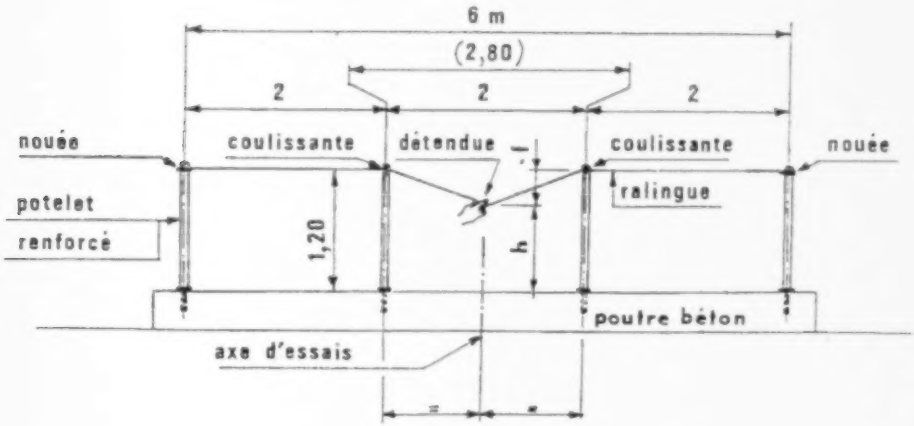


Figure 3 : Essais statiques avec un effort de traction de 1 m/mm



A - Le mannequin anthropomorphe et son chemin de roulement



B – Système de garde-corps

Figure 4 : Mannequin anthropomorphe et son chemin de roulement et Système de garde-corps (extrait de Jacmin et Mayer, 1984)

1.1.8. Garde-corps en bois

Les garde-corps en bois sont généralement fabriqués et installés à pied d'œuvre sur les chantiers. Ils sont faits d'une lisse supérieure en 38 mm x 89 mm (2x4 nominale), d'une lisse intermédiaire en 38 mm x 89 mm (2x4 nominale) et d'une plinthe en 19 mm x 140 mm (1x6 nominale), assemblées solidement aux montants de 38 mm x 89 mm (2x4 nominale) par clouage (Figures 5, 6 et 7). Les montants sont cloués directement à un fond de clouage vertical, sinon, ils sont assemblés à une base et renforcés par un gousset en contre-plaqué (Figure 5) ou par une jambe inclinée à environ 45° (Figures 6 et 7). La base est alors assemblée au plancher par clouage ou par des ancrages décrits au paragraphe 1.1.5 (Figures 1 et 2). Si le garde-corps en bois n'est pas conçu par un ingénieur, les textes réglementaires donnent les prescriptions minimales géométriques à respecter pour que le garde-corps soit conforme aux exigences de résistance. Les travailleurs utilisent généralement des 2x4 neufs pour construire les garde-corps. La norme CAN/CSA-086.1-M89 «Engineering Design in Wood - Limit States Design» (CAN/CSA-086.1-M89, 1989) du Conseil canadien du bois donne l'ensemble des caractéristiques géométriques et mécaniques du bois.

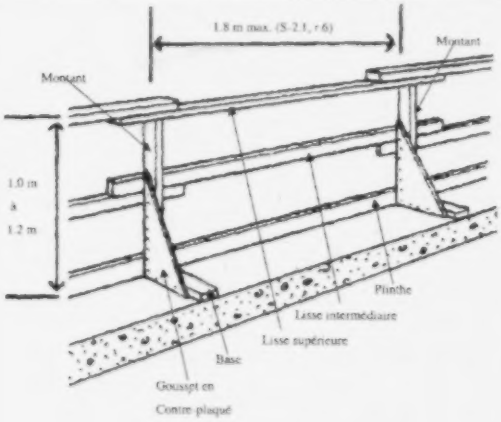


Figure 5 : Garde-corps en bois avec gousset en contre-plaqué

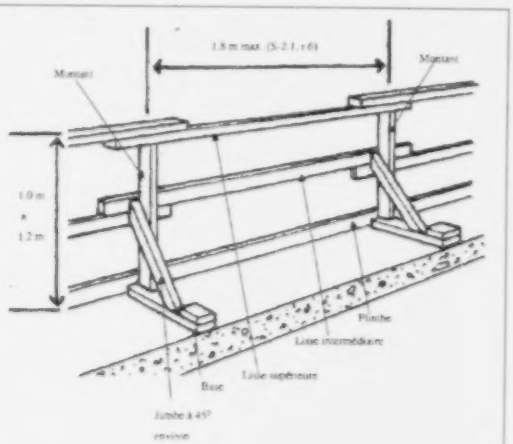


Figure 6 : Garde-corps en bois avec jambe à 45° avec une cale

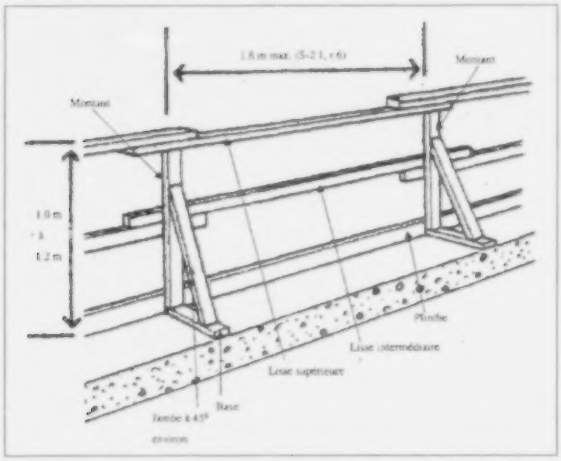


Figure 7 : Garde-corps en bois avec jambe à 45^0

1.1.9. Garde-corps faits de cadres métalliques ou en bois attachés avec des broches à des étais métalliques comme supports

Les garde-corps avec des étais métalliques comme supports sont généralement installés à pied d'œuvre entre deux planchers sur les chantiers. Ils sont faits d'une filière d'étais métalliques placés à environ 1.83 m (6 pieds) centre en centre sur le périmètre du plancher et des cadres métalliques ou en bois préfabriqués de 1.2 m de hauteur et de 2.4 m de longueur. Les cadres sont attachés aux étais avec des fils métalliques (broches # 16) et sont placés de tel sorte qu'ils se chevauchent sur une longueur de 0.60 m (2 pieds) sur les étais métalliques.

À chaque étage (Figure 8), au bout de trois à quatre jours, la dalle supérieure est décoffrée. Les étais métalliques sont mis en place pour étayer la jeune dalle. Lors de l'érection de la charpente en béton armé, hormis le retrait et le fluage du béton, il n'y a aucune installation permanente ou temporaire qui est à l'origine de la vibration pour causer le desserrage des étais métalliques. La vibration viendrait de la coulée de la dalle de l'étage supérieur suivant, mais elle n'est pas dommageable pour le desserrage des étais. D'après le Construction Safety Association of Ontario (CSAO, 1996), l'étai métallique est un support résistant qui a fait ses preuves dans l'industrie de la construction sur le continent nord-américain.

Les travailleurs installent à environ 1 m du bord de la dalle une filière d'étais métalliques sur le périmètre de la dalle. À l'aide de l'écrou de réglage, les travailleurs coincent solidement les étais métalliques entre les planchers inférieur et supérieur. Les étais métalliques servent alors de supports aux cadres métalliques ou en bois, attachés en butée aux étais avec des fils métalliques. Les étais métalliques couramment utilisés dans les travaux de coffrage sont de 2 à 4 mètres de hauteur et ils peuvent supporter des charges de 12 à 40 kN (2 500 à 9 000 livres). Le Construction Safety of Ontario (CSAO, 1996) recommande la prudence avec les étais métalliques avec ressorts puisqu'ils peuvent développer des forces élevées.

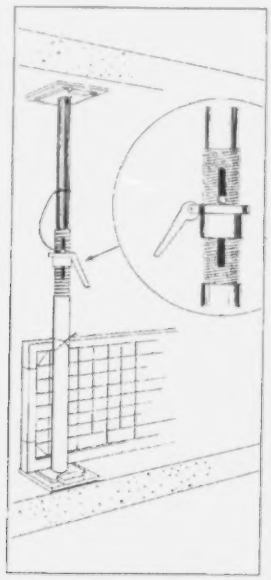


Figure 8 : État métallique (extrait du CSAO)

Pour assurer la sûreté de l'ancrage, il faut que la force de serrage soit surabondante, sans trop serrer, surtout lorsque le béton est jeune car ceci peut facilement endommager la dalle supérieure au point de contact plaque de l'étai-dalle. Il y a aussi le fluage, le retrait et la déformation du béton à prendre en compte. Pour assurer la sécurité du garde-corps, il faut un couple minimum de serrage. Le couple de serrage dépend de la force du travailleur (petit, moyen, grand). Or, présentement, il n'y a aucune indication sur le couple de serrage. Le garde-corps en place a-t-il la résistance adéquate? Ce type de garde-corps résiste par frottement engendré par le contact de la plaque d'appui de l'étai et le béton. La connaissance de la force compressive dans l'étai métallique et le coefficient de frottement béton-plaque de contreplaqué de l'étai permettent de calculer cette force de frottement.

2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Les objectifs de la présente étude sont les suivants :

1) Vérifier si la conception et l'installation des garde-corps fabriqués et installés à pied d'œuvre sur les chantiers de construction sont sécuritaires et rencontrent les exigences des articles 3.8.2 et 3.8.3 du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec pour assurer aux travailleurs une meilleure protection contre les chutes et définir les paramètres d'ancrage;
2) Comparer et analyser les exigences de résistance des règlements et normes internationaux et proposer si possible, un critère enveloppe synthèse des exigences de résistance qui reflètent mieux la réalité;
3) Définir le couple de serrage minimal pour assurer la sûreté d'un étai métallique comme support de garde-corps;
4) Définir un critère de flèche pour les garde-corps.

3. DÉMARCHES SUIVIES

L'approche suivie dans le cadre de cette étude comprend les étapes suivantes :

- observation sur les chantiers et des entrevues avec les responsables de SST et les contremaîtres sur les chantiers pour répertorier les différents types de garde-corps utilisés sur les chantiers du Montréal métropolitain en vue de sélectionner le(s) garde-corps le(s) plus prometteur(s) et colliger des données sur ce(s) garde-corps afin de pouvoir le(s) reconstituer au laboratoire;
- développement d'une méthode et d'un protocole d'essais pour vérifier si les garde-corps fabriqués et installés à pied d'œuvre sont conformes aux exigences du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec;
- des essais au laboratoire pour :
  - évaluer la résistance des systèmes de garde-corps suivant le protocole d'essais;
  - déterminer le couple minimal de serrage des étais métalliques utilisés comme supports pour les garde-corps et le coefficient de frottement béton-plaque d'appui en contreplaqué;
  - un critère de flèche pour les garde-corps.
- l'analyse des résultats en vue de formuler des recommandations.

3.1. Observations sur les chantiers

Dans un premier temps, des observations ont été effectuées sur les chantiers pour répertorier et documenter les différents systèmes de garde-corps utilisés sur les chantiers de Montréal métropolitain. Ces observations ont permis de cibler des garde-corps en bois fabriqués et installés à pied d'œuvre et des garde-corps avec des étais métalliques comme supports les plus fréquemment utilisés. Très vite, il est apparu que les nombreux paramètres à considérer, entre autres, la nature et les conditions des matériaux utilisés, le montage et la qualité du montage et les conditions d'ancrage ne favorisaient pas l'application des formules classiques de la résistance des matériaux ou les méthodes des éléments finis. Dès lors, la méthode la plus simple et la plus

rapide pour vérifier si un garde-corps est conforme à un règlement ou une norme est de réaliser des essais in situ en appliquant les forces stipulées par les exigences de résistance de ces documents. Avec les contraintes de production et les problèmes de sécurité que cela posait au chantier, nous nous sommes rendus compte que réaliser les essais in situ n'était pas la démarche la plus appropriée. Une façon de procéder consistait alors à reconstituer au laboratoire, les garde-corps observés aux chantiers, en respectant les mêmes conditions de mise en œuvre. Les essais pouvaient alors être réalisés sur les garde-corps reconstitués en toute sécurité au laboratoire.

Pour ce faire, dans un deuxième temps, des observations détaillées de ces garde-corps ont été effectuées en collaboration avec les inspecteurs des directions régionales de la CSST de Laval et de Montréal. Ces observations nous ont permis, entre autres :

- de rencontrer et de discuter avec les contremaîtres et les responsables de SST des difficultés rencontrées lors de la mise en œuvre des garde-corps aux chantiers;
- de relever les conditions d'installation détaillées de ces garde-corps sur les chantiers, entre autres :
  - les caractéristiques techniques, géométriques et matérielles des membrures de garde-corps fabriqués et installés à pied d'œuvre sur les chantiers;
- de relever les différentes conditions de montage et d'assemblage sur la fausse charpente;
  - de documenter en photos et sur cassettes vidéo les deux principaux types de garde-corps installés à pied d'œuvre.

3.1.1. Principales constatations des observations aux chantiers

Voici les principales constatations de nos observations aux chantiers.

Garde-corps en bois

1) Les garde-corps en bois faits de 2x4 étaient montés à environ 1m du vide (Figures 9 et 10);
2) L'assemblage des montants du garde-corps à la fausse charpente se faisait par clouage direct. Si le fond de clouage était vertical, les montants étaient cloués directement sur celui-ci (Figure 11); par contre si le fond de clouage était horizontal, les montants étaient assemblés à une base (patte) et renforcés par un gousset en contreplaqué (Figure 9) ou une jambe en 2x4 inclinée à environ 45° (Figure 12). La base était clouée au plancher;
3) La lisse supérieure était faite d'un 2x4 appuyée sur des montants de même dimension espacés d'au plus 1.8 m placés de telle façon que la largeur de 90 mm du montant était perpendiculaire à l'axe de la largeur de la lisse supérieure (Figure 9). Ce montage n'est pas conforme à l'article 3.8.3.2 a) du Code de sécurité pour les travaux de construction qui stipule que la largeur de 90 mm du montant soit dans l'axe de la largeur de la lisse supérieure. L'explication qu'on pourrait donner au montage du montant perpendiculaire à l'axe de la largeur de la lisse supérieure serait que ce type de montage facilite le clouage du montant parce qu'il est plus facile de clouer sur la petite dimension que sur la grande dimension du 2x4;

4) La lisse intermédiaire était un 2x4 à mi-hauteur et fixée solidement à l'intérieur des montants;
5) La plinthe était soit un 1x4 ou un 1x6 mais d'au moins 90 mm de hauteur et fixée solidement à l'intérieur des montants (Figure 9);
6) La hauteur des lisses supérieures variait entre 1 à 1.2 m au-dessus de l'aire et respectait les exigences de construction de l'article *3.8.3 Construction* du S-2.1, r.6, à savoir une hauteur comprise entre 1 à 1,2 m au-dessus de l'aire de travail.

Figure 9 : Garde-corps en bois près du vide sur une dalle de béton

Figure 10 : Garde-corps en bordure du vide sur la fausse charpente de coffrage

Figure 11 : Montants de garde-corps cloués sur un fond de clouage vertical

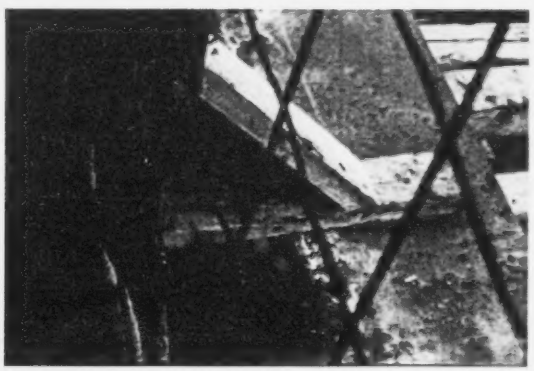


Figure 12 : Jambe en 2x4 pour solidifier le montant

Garde-corps avec des étais métalliques comme supports

Les étais métalliques utilisés comme support de garde-corps sont ceux habituellement utilisés comme fausse charpente de coffrage de dalle (Figure 13). Ils sont composés d'une partie mâle (coulisse) de 2 m environ de long qui coulisse dans une partie femelle (fût) de 2.2 m environ. Le fût et la coulisse sont munis aux extrémités, d'une plaque métallique trouée au centre. Des trous d'ajustement espacés de 150 mm (6 po.) et un écrou de serrage au centre de l'étai permettent le réglage grossier et l'ajustement fin. Sur les chantiers observés, les travailleurs intercalent, aux deux extrémités de l'étai, une plaque de contreplaqué entre les plaques d'appui métallique de l'étai et la dalle afin de ne pas endommager la dalle fraîchement coulée. Ils percent les plaques de contreplaqué avec un clou de 4 pouces (Figure 14) qu'ils font glisser dans les trous des plaques d'appui métalliques de l'étai (Figure 15).

Les travailleurs installent les étais métalliques en périmètre de la dalle à environ 1 m du vide à environ 1.83 m (6 pieds) de centre en centre (Figure 16). Ils coincent les étais entre les dalles supérieure et inférieure en appliquant une force de serrage à bout de bras à l'aide d'une clé (Figure 17). Deux types de cadres, faisant office de garde-corps, ont été observés : 1) un cadre en treillis métallique (Figure 16) et 2) un cadre en bois fait de 2x4, 4 pi. x 8 pi. (Figure 18). Les cadres sont placés en faisant chevaucher les cadres adjacents sur 2 pieds et sont attachés à l'étai avec des fils métalliques no. 16.

À l'issue de nos observations, les garde-corps suivants ont été retenus pour les essais en laboratoire :

- un garde-corps en bois de type 1 utilisé sur deux édifices commerciaux;
- un garde-corps de type 2 avec des étais métalliques comme support et un cadre en bois fait de 2x4 utilisé sur un édifice résidentiel.

Ces deux garde-corps étaient, à notre avis, les mieux construits et les plus prometteurs pour subir des essais en laboratoire.

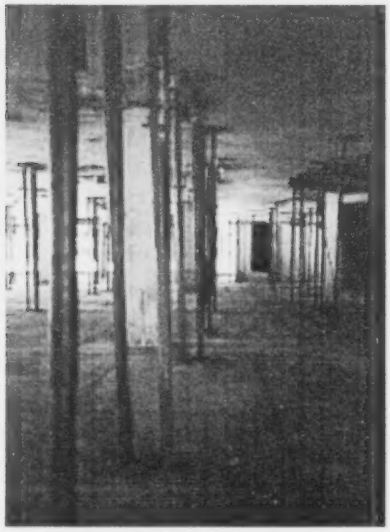


Figure 13 : États métalliques utilisés comme fausse charpente de coffrage

Figure 14 : Plaque d'appui de contreplaqué percé au centre par un clou de 4 pouces

Figure 15 : Plaque d'appui de contreplaqué assemblée à la plaque d'appui de l'étai en glissant le clou de 4 pouces

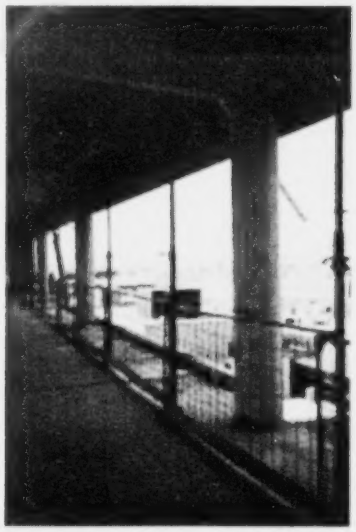


Figure 16 : Cadre en treillis métallique comme garde-corps

Figure 17 : Clé pour serrer l'étai métallique

Figure 18 : Cadre en bois fait de 2 x 4

3.2. Méthode de vérification - Protocole d'essais

La méthode pour vérifier si les garde-corps sont conformes aux exigences de S-2.1, r.6 s'articule autour du protocole d'essais qui comprend deux parties distinctes indépendantes. La première partie de la méthode vérifie si les garde-corps sont conformes au Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec. La deuxième partie comprend une série d'essais dynamiques s'inspirant de l'étude de Jacmin et Mayer de l'INRS (Jacmin et Mayer, 1984) pour vérifier la capacité du garde-corps à retenir un torse de bois de 100 kg frappant le garde-corps à une vitesse de 2 m/s. À noter que le Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec n'exige pas ces essais dynamiques. L'INRS utilise un mannequin anthropomorphe de 80 kg ayant des dimensions proches de celles d'un homme de taille moyenne. Dans la présente étude, le torse de bois de 100 kg utilisé est identique à celui utilisé dans les essais de normalisation en protection contre les chutes de l'ACNOR (CAN/CSA-Z259.10-M90 – Full Body Harnesses).

3.2.1. Description du protocole d'essais - Première partie

La première partie du protocole vise d'abord à vérifier les exigences de construction de l'article 3.8.3 et les exigences de résistance de l'article 3.8.2 du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec (S-2.1, r.6, 2001). Pour ce faire, nous mesurons les membrures du garde-corps en bois in situ et nous les comparons avec les exigences de construction de l'article 3.8.3.

Pour rappel, l'*Article 3.8.3. Construction* stipule

1. Tout garde-corps doit avoir une hauteur qui varie entre 1 m et 1,2 mètre au-dessus de l'aire où le travailleur se trouve.

2. Un garde-corps en bois doit être constitué d'une :

a) lisse supérieure d'une épaisseur minimale de 40 millimètres sur une largeur de 90 millimètres appuyée sur des montants de même dimension espacés d'au plus 1,8 mètre placés

de telle façon que la largeur de 90 millimètres du montant soit dans l'axe de la largeur de la lisse supérieure;

b) traverse intermédiaire d'au moins 75 millimètres de large à mi-hauteur et fixée solidement à l'intérieur des montants; et

c) plinthe d'au moins 90 millimètres de hauteur et fixée solidement à l'intérieur des montants.

L'Article 3.8.2 Résistance stipule :

1. Un garde-corps doit être conçu pour:

a) résister à une force horizontale concentrée de 900 newtons appliquée à n'importe quel point de la lisse supérieure; et

b) résister à une force verticale concentrée de 450 newtons appliquée à n'importe quel point de la lisse supérieure.

Les essais 1° à 4° correspondent aux cas de charges les plus critiques de l'article 3.8.2 du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec qui donnent les sollicitations et les déformations maximales dans les membrures du garde-corps.

1° Charges de 900 N horizontale et de 450 N verticale appliquées simultanément sur un montant ancré tel qu'au chantier - mesure de flèche pour tracer la courbe force vs déformation - observation du comportement du montant sous charge - mesure de la flèche à 900 N - mesure de la contrainte maximale à la base du montant par une jauge de contrainte.

2° Charges de 900 N horizontale et de 450 N verticale appliquées simultanément à mi-portée de la lisse supérieure d'une section de garde-corps ancré tel qu'au chantier - mesure de la flèche - observation du comportement de la section du garde-corps sous charge – mesure de la déformation maximale aux points critiques du garde-corps par des jauges de contrainte.

3. Charges de 900 N horizontale et de 450 N verticale appliquées simultanément à mi-portée de la lisse supérieure de la travée de rive d'une suite de trois sections de garde-corps ancré tel qu'au chantier - mesure de la flèche - observation du comportement de la section du garde-corps sous charge – mesure de la déformation maximale aux points critiques du garde-corps par des jauges de contrainte.

4 Charges de 900 N horizontale et de 450 N verticale appliquées simultanément à mi-portée de la lisse supérieure de la travée centrale d'une suite de trois sections de garde-corps ancré tel qu'au chantier - mesure de la flèche - observation du comportement de la section du garde-corps sous charge – mesure de la déformation maximale aux points critiques du garde-corps par des jauges de contrainte.

Si les garde-corps réussissent la première partie du protocole, ils seront conformes au Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec.

3.2.2. *Deuxième partie - Essais dynamiques*

Les essais dynamiques 5 à 8 s'inspirent de l'étude de MM. Jacmin et Mayer de l'INRS et visent à vérifier la capacité du garde-corps à retenir un torse de bois de 100 kg.

5. Un torse de bois de 100 kg frappe le montant d'une section de garde-corps à une vitesse de 2 m/s - observation du comportement du montant ancré tel qu'au chantier sous la force d'impact - capacité du montant à retenir le torse de bois sans rupture ou abandon de la charge - mesure des déformations xx, yy, zz avec des capteurs de déplacement - prise de vues avec la caméra à haute vitesse.
6. Un torse de bois de 100 kg frappe la lisse supérieure d'une section de garde-corps à une vitesse de 2 m/s - observation du comportement de la section du garde-corps ancré tel qu'au chantier sous la force d'impact - capacité du garde-corps à retenir le torse de bois sans rupture ou abandon de la charge - mesure des déformations xx, yy, zz avec des capteurs de déplacement - prise de vues avec la caméra à haute vitesse.
7. Un torse de bois de 100 kg frappe la lisse supérieure de la section de rive (gauche ou droite) d'une suite de trois sections de garde-corps ancré tel qu'au chantier à une vitesse de 2 m/s - observation du comportement de la section du garde-corps sous la force d'impact; capacité du garde-corps à retenir le torse de bois sans rupture ou abandon de la charge - mesure de la flèche - prise de vues avec la caméra à haute vitesse.
8. Un torse de bois de 100 kg frappe la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps à une vitesse de 2 m/s - observation du comportement de la section du garde-corps ancré tel qu'au chantier sous la force d'impact - capacité du garde-corps à retenir le torse de bois sans rupture ou abandon de la charge - mesure de la flèche - prise de vues avec la caméra à haute vitesse.

Si les garde-corps réussissent la deuxième du protocole, ils auront la capacité à retenir un torse de bois de 100 kg frappant les garde-corps à une vitesse de 2 m/s.

3.3. Les essais au laboratoire

Les essais ont été réalisés au laboratoire de structures de l'École Polytechnique en octobre 2001 suivant le protocole d'essais décrit précédemment au paragraphe 3.2.1. Pour les garde-corps en bois de type 1, la plupart des montants en 2x4 étaient érigés en chantier suivant l'inertie faible, c'est-à-dire avec la largeur de 90 mm du montant perpendiculaire à l'axe de la largeur de la lisse supérieure. Dès lors, il fut décidé de tester les montants suivant le même montage au chantier, soit suivant la plus faible inertie. La réussite de l'essai suivant la plus faible inertie validait automatiquement les essais avec la plus forte inertie. Pour les garde-corps avec des étais métalliques comme supports pour des cadres en bois de type 2, la force de serrage dans l'étai métallique et le coefficient de frottement statique μ ont été déterminés expérimentalement en traçant la courbe F versus P (Figure 19), avec :

F : force de frottement = μR, définie comme la force requise pour initier le glissement de la plaque.
P : force dans l'étai sollicitant les dalles de béton = R (résistance des dalles).

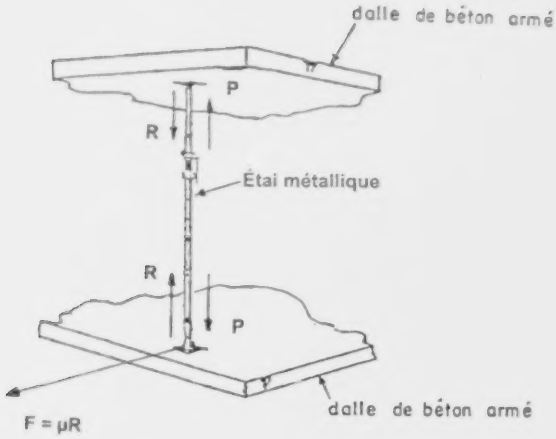


Figure 19 : Détermination de la force de serrage dans l'étai et du coefficient de frottement μ

Pour les garde-corps en bois fabriqués et installés à pied d'œuvre et les garde-corps avec des étais métalliques comme supports, les essais ont été effectués sur un montant, une section de garde-corps et une suite de section de trois garde-corps. En utilisant la méthode des coefficients forfaitaires décrite dans le manuel du conseil canadien du bois (CAN/CSA-086.1-M89, 1989), l'étude d'un garde-corps complet de travées égales peut être ramenée à l'étude d'une suite de trois travées égales. Il était impensable de reconstituer un garde-corps complet sur le périmètre du plancher en laboratoire.

3.4. Présentation générale des essais

3.4.1. Généralités

Le montage consistait à ancrer des garde-corps dans des dalles de béton selon diverses configurations prévues au protocole d'essai. Ces garde-corps ont été montés au laboratoire en suivant les mêmes conditions que celles rencontrées en chantier. Les matériaux utilisés pour ériger le montage et les garde-corps ont été sélectionnés afin d'être conformes à la qualité retrouvée sur chantier. Lors des essais, les éléments des garde-corps ont été soumis à des chargements statiques ou dynamiques tels que décrits dans le protocole d'essais au paragraphe 3.2.1. Dans le cas des essais statiques, telles que stipulées par les exigences de résistance de l'article 3.8.2 de S-2.1, r.6, une force horizontale de 900 N combinée à une force verticale de 450 N étaient appliquées. Les essais dynamiques consistaient à soumettre les garde-corps à un impact produit par l'entremise d'un torse de 100 kg lancé à une vitesse de 2 m/s. Chacun des essais réalisés est décrit plus en détail dans les sections s'y rapportant.

3.4.2. Matériaux

3.4.2.1. Béton

Le béton utilisé pour la fabrication des dalles devait présenter une résistance en compression (f'_c) simulant autant que possible celle des dalles sur lesquelles les garde-corps sont installés en chantier. La résistance moyenne à la compression du béton fabriqué au Laboratoire était de 29 MPa.

3.4.2.2. Ferraillage

L'armature utilisée dans les dalles correspond au ferraillage minimum ($A_{s,min}$) d'une dalle d'édifice tel que prescrit dans la norme CSA-A23.3-M94 – Design of concrete structures (CSA-A23.3-M94, 1994), soit 0.2% dans chaque direction.

3.4.2.3. Bois

Les pièces de bois utilisées pour fabriquer les garde-corps étaient des 2x4 usuels (SPF) achetés dans des quincailleries à grande surface où s'approvisionnent les chantiers pour un petit volume de bois. Pour un grand volume, certains chantiers achètent le bois chez les mêmes fournisseurs de quincaillerie à grande surface. Les caractéristiques mécaniques de l'essence de bois avec laquelle seront réalisés les essais sont celles spécifiées par le Conseil Canadien du bois (CAN/CSA-086.1-M89, 1989).

3.4.2.4. Étais et cadres

Les étais métalliques (Figure 37) et les cadres de bois préfabriqués (Figure 46) ont été achetés chez l'entrepreneur "Les Coffrages Dominic", situé à Montréal. Ce sont les étais et les cadres usuels que l'entrepreneur utilise sur ses chantiers de coffrage au Québec.

3.5. Montage

3.5.1. Dalles de support

Afin de reproduire les conditions présentes dans les édifices où les garde-corps sont installés, des dalles de béton ont été fabriquées. La plus grande de ces dalles, la dalle inférieure, simulait le plancher de l'étage de travail auquel les garde-corps sont installés. Les dalles supérieures, au nombre de 4, représentaient le plafond de ce même étage.

Dalle inférieure

La dalle inférieure avait une longueur de 6.10 m (20 pieds), une largeur de 0.762 m (30 po.) et une épaisseur de 203.2 mm (8 po.). La largeur a été choisie afin d'accommoder la patte du montant du garde-corps tout en laissant un espace libre de 76.2 mm (3 po.) de chaque côté. La longueur de la dalle permettait d'installer 3 travées de garde-corps de 1.83 m (6 pieds) chacune. La fabrication de la dalle inférieure est montrée à la Figure 20.

Figure 20 : Fabrication de la dalle inférieure

Figure 21 : Fabrication des dalles supérieures

Dalles supérieures

Quatre dalles supérieures ont été fabriquées. Ces dalles avaient une longueur de 762 mm (30 po.), une largeur de 304.8 mm (12 po.) et une épaisseur de 203.2 mm (8 po.). Les dalles supérieures ont été utilisées pour fixer les étais à leur extrémité supérieure afin de reproduire leur mode d'ancrage aux planchers de béton des édifices. La fabrication des dalles supérieures est montrée à la Figure 21.

3.6. Garde-corps

Garde-corps en bois

Deux types de garde-corps retenus lors de nos observations en chantiers ont été testés en suivant les modèles utilisés sur un édifice commercial à Kirkland et sur un édifice résidentiel à Dorval. Ces garde-corps diffèrent principalement par le type d'ancrage employé afin de fixer les montants principaux des garde-corps.

3.6.1. Garde-corps de type 1

Le montant type de ce garde-corps est fait d'une pièce de 38 mm x 89 mm (2x4 nominale) en bois de 1041.4 mm (41 po.) de hauteur clouée à l'aide de clous communs de 3½ po. à une base (patte) en 38 mm x 89 mm (2x4 nominale). La connexion est rigidifiée par deux goussets de contreplaqué taillés à 45° d'environ 304.8 mm (12 po.) de côté, fixés de chaque côté à l'aide de 4 clous communs de 2½''. Le garde-corps testé est semblable aux garde-corps installés sur les chantiers. Comme nous voyons à la Figure 22, les montants sont espacés d'environ 1.83 m (6 pieds) et sont reliés par une lisse supérieure faite d'un 38 mm x 89 mm (2x4 nominale), d'une lisse intermédiaire en 38 mm x 89 mm (2x4 nominale) et par une plinthe de 1x6 au bas.

Figure 22 : Garde-corps de type 1

La patte du montant de garde-corps est assemblée à la dalle en perçant deux trous dans la dalle à travers la patte avec un foret à béton de ¼'' de diamètre pour accommoder des clous communs de 3½'' (Figure B.2 a) à l'Annexe B). Un morceau de fil de fer no. 16 est ensuite introduit jusqu'au fond du trou. Celui-ci est coupé suffisamment long afin qu'il dépasse légèrement du haut de la patte. Les clous communs de 3½'' sont enfoncés à l'aide d'un marteau. Les clous sont placés à 6'' des extrémités de la patte. L'assemblage final est tel que montré à la Figure 23.

Figure 23 : Assemblage des montants des garde-corps de type 1 à la dalle inférieure

3.6.2. Garde-corps de type 2

Ce type de garde-corps est obtenu en coinçant des étais entre les dalles de plancher inférieure et supérieure du niveau à protéger puis en y attachant des cadres de bois préfabriqués faisant office de balustrade avec du fil de fer no. 16. L'espacement des étais est d'environ 6 pieds. Les montants et les lisses supérieure et intermédiaire des cadres sont fabriqués à partir de pièces de 2x4 ou du treillis métallique. La plinthe du bas est formée d'une planche de 1x6. La configuration de l'assemblage est montrée à la Figure 24.

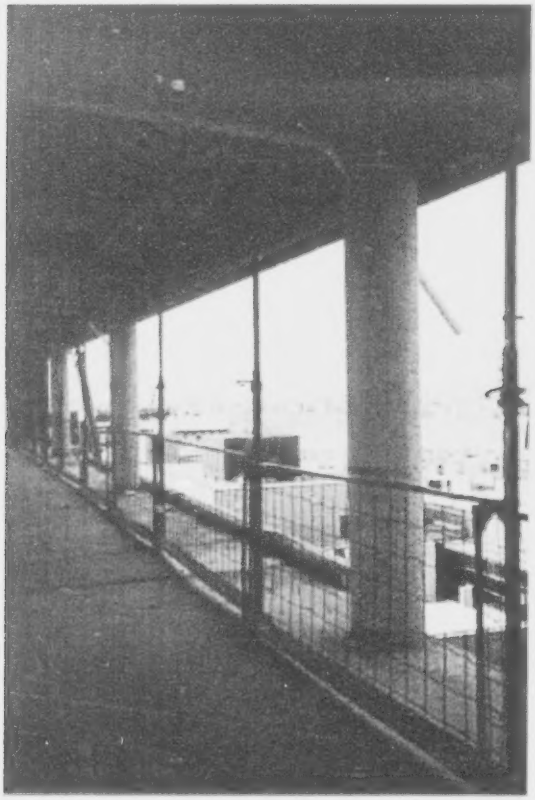


Figure 24 : Garde-corps de type 2

3.7. Instrumentation

Le Tableau 4 énumère les instruments et les appareils utilisés lors des différents essais (Séries 4-5-6-7-8) en octobre 2001. Les instruments et équipements de mesure et d'acquisition de données ont été fournis par l'École Polytechnique de Montréal, à l'exception de la caméra haute vitesse, fournie par l'IRSST. La numérotation des essais est celle indiquée dans le rapport ST03-19 de l'École Polytechnique (ST03-19, 2003).

Tableau 4 : Instruments utilisés pour les essais

Séries d'essais	Numéro d'essai	Instrumentation (par essai)
Série 4 : Essais statiques des garde-corps en bois	4-1	2 jauges électriques 1 capteur de déplacement
	4-2, 4-3, 4-4	6 jauges électriques 1 capteur de déplacement
Série 5 : Essais dynamiques des garde-corps en bois	5-1	2 capteurs de déplacement caméra à haute vitesse
	5-2, 5-3, 5-4	3 capteurs de déplacement caméra à haute vitesse
Série 6 : Essais statiques avec des étais métalliques comme supports	6-1, 6-2	Cellule de charge
	6-3	1 capteur de déplacement
	6-4, 6-5, 6-6	3 capteurs de déplacement
Série 7 : Essais dynamiques avec des étais métalliques comme supports	7-1	2 capteurs de déplacement Caméra à haute vitesse
	7-2, 7-3, 7-4	3 capteurs de déplacement Caméra à haute vitesse
Série 8 : Essais de basculement avec lisse faite de différents matériaux	8-1a	2 capteurs de déplacement Caméra à haute vitesse
	8-1b, 8-1c 8-2, 8-3	3 capteurs de déplacement Caméra à haute vitesse

4. SÉRIE 4 : ESSAIS STATIQUES SUR DES GARDE-CORPS EN BOIS

4.1. Description des essais

Les essais de la série 4 visaient à déterminer la résistance des garde-corps de type 1, décrits à la section 3.6, lorsque soumis à des forces statiques verticale et horizontale telles que décrites dans le protocole d'essais. Cette série comporte 4 types d'essais, sollicitant selon le cas le montant de l'assemblage (essai 4-1), la lisse supérieure d'un garde-corps d'une seule travée (essai 4-2), la lisse supérieure de la travée de rive d'un garde-corps comportant 3 travées (essai 4-3) et finalement la lisse supérieure de la travée centrale d'un garde-corps formé de 3 travées (essai 4-4). Ces essais sont décrits plus en détail dans les sous-sections s'y rapportant. Les résultats obtenus sont présentés à l'annexe A-1 tandis que des photos sont montrées à l'annexe B-1.

4.2. Essai 4-1 : Essais statiques sur un montant en bois

Le montage consistait en un montant en bois (2x4) encastré dans la dalle de béton inférieure. Une charge de 900 N horizontale et une charge de 450 N verticale ont été appliquées simultanément à 1.05 m de hauteur, tel qu'illustré à la Figure 25. Un total de quatre essais a été réalisé sur des montants isolés. La Figure 26 présente des photos des quatre essais de la série 4.1.

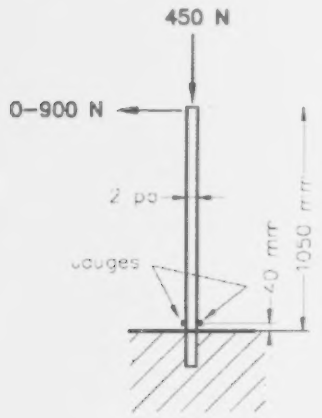


Figure 25 : Schéma des essais 4-1a, 4-1b et 4-1c

Trois essais (essais 4-1a, 4-1b et 4-1c) ont été réalisés sur des montants encastrés dans la dalle de béton. Étant donné l'encastrement rigide du montant dans la dalle, la résistance du montant est maximisée. Nous devons noter que le montant est fléchi selon son inertie la plus faible, soit dans le sens du 2 pouces.

Un essai supplémentaire, soit l'essai 4-1supp., a été réalisé sur un montant de 2x4 attaché à une base (patte) fixée à la dalle par des clous et du fil de fer et rigidifié par des goussets de contreplaqué, comme cela se fait au chantier pour les garde-corps de type 1. Le mode de fabrication de cette attache a été décrit précédemment en 3.6.

Ces essais ont permis :

- de mesurer la flèche sous les charges appliquées. Les diagrammes force-déplacement sont fournis aux Figures A.1, A.3, A.5 et A.7 de l'annexe A-1;
- de mesurer les déformations des fibres en traction et compression à la base du montant. Les diagrammes force-déformation obtenus sont fournis aux Figures A.2, A.4, A.6 et A.8 de l'annexe A-1;
- d'observer le comportement du montant sous les charges statiques appliquées.

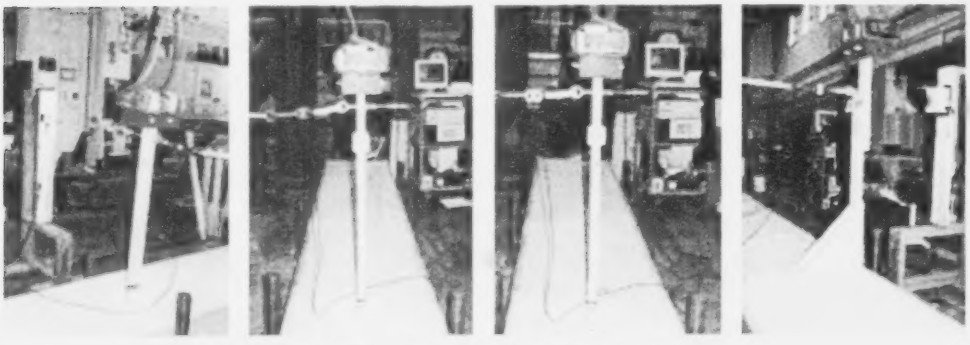


Figure 26 : Vues des essais 4-1a, 4-1b et 4-1c supp.

4.3. Essai 4-2 : Essai statique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois

Le montage consistait en un garde-corps comportant une seule travée constituée de deux montants verticaux en bois (2x4) ancrés par une patte de bois renforcée de goussets en contreplaqué et d'une lisse horizontale en bois (2x4) de 1.83 m (6 pieds) de portée. La lisse était située à une hauteur de 1.20 m de la dalle. Une charge horizontale de 900 N et une charge verticale de 450 N ont été appliquées simultanément au centre de la lisse tel qu'illustré à la Figure 27.

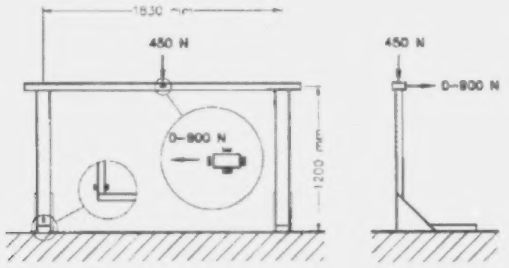


Figure 27 : Schéma de l'essai 4-2

Les montants dans cet essai ont été disposés pour fléchir dans un plan vertical selon leur axe d'inertie faible alors que la lisse était clouée à plat sur l'extrémité supérieure des montants. La Figure 28 présente divers aspects de l'essai.

Cet essai a permis de :

- mesurer les déplacements du point central de la lisse supérieure (Figure A.9);
- mesurer avec des jauges les déformations des fibres tendues et comprimées à la base d'un montant (Figure A. 10) et au milieu de la travée de la lisse supérieure (Figure A.l 1).

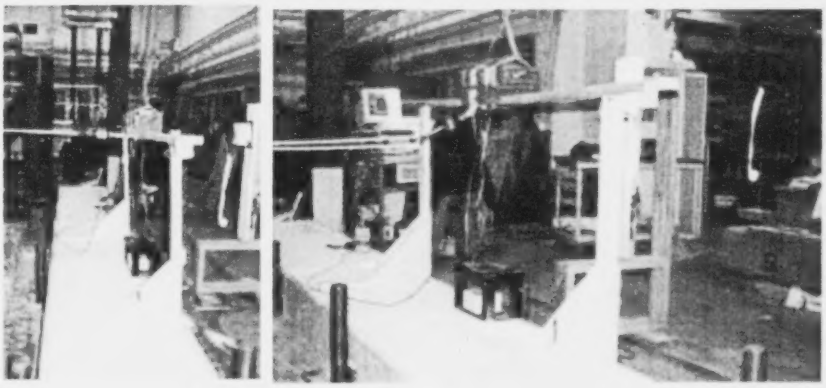


Figure 28 : Photos illustrant la réalisation de l'essai 4-2

4.4. Essai 4-3 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps

Le montage consistait en un garde-corps continu de trois baies de 1.83 m (6') de portée chacune. Il était constitué de quatre montants verticaux en bois (2x4) ancrés par une patte de bois renforcée de goussets en contreplaqué surplombés d'une lisse horizontale en bois, située à une hauteur de 1.20 m de la dalle. Une lisse intermédiaire en 2x4 et une plinthe en 1x6, vissées à l'aide de vis #10 de 2½ po complétaient le tout. Une charge horizontale de 900 N et une charge verticale de 450 N ont été appliquées simultanément au centre de la lisse supérieure de la première baie, tel qu'illustré à la Figure 29. La Figure 30 présente divers aspects de l'essai.

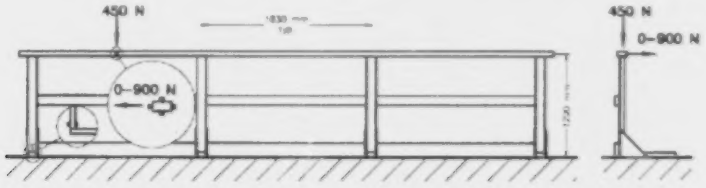


Figure 29 : Schéma de l'essai 4-3

Cet essai a permis de :

- mesurer les déplacements de la section centrale de la lisse supérieure chargée (Figure A. 12)
- mesurer les déformations unitaires à la base des montants (Figure A. 13) et à la section centrale de la lisse supérieure (Figure A.14)

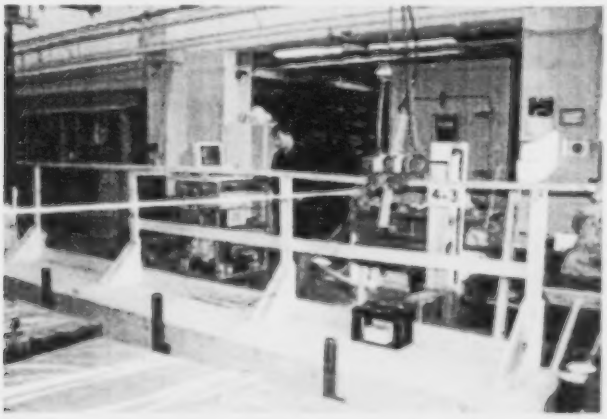


Figure 30 : Essai d'une section de rive de la série 4-3

4.5. Essai 4-4 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps

Le montage consistait en un garde-corps continu de trois travées de 1.83 m (6') de portée chacune. Il était constitué de quatre montants verticaux en bois (2x4) ancrés par une patte de bois renforcée de goussets en contreplaqué et d'une lisse horizontale en bois (2x4), située à une hauteur de 1.20 m de la dalle. Une lisse intermédiaire en 2x4 et une plinthe en 1x6, fixées à l'aide de vis #10 de 2½ po, complétaient le tout. Une charge horizontale de 900 N et une charge verticale de 450 N ont été appliquées simultanément au centre de la lisse supérieure de la baie centrale, tel qu'illustré à la Figure 31. La Figure 32 présente l'essai 4-4.

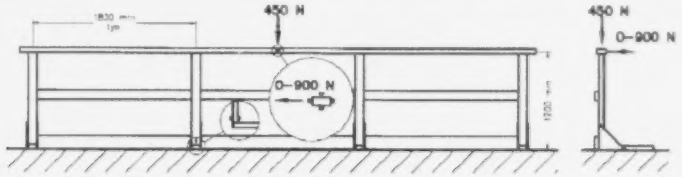


Figure 31 : Schéma de l'essai 4-4

Cet essai, dont nous montrons un exemple à la Figure 32, a permis de :

- mesurer les déplacements de la section centrale de la lisse supérieure chargée (Figure A. 15);
- mesurer les déformations unitaires à la base du montant (Figure A. 16) et au centre de la travée de la lisse supérieure (Figure A. 17).

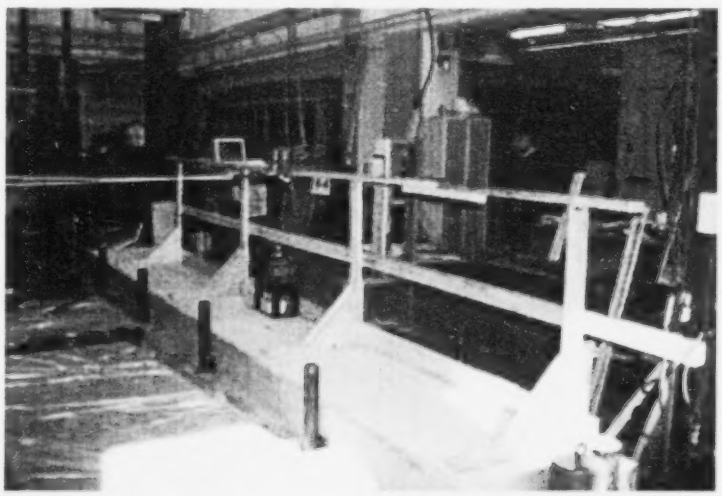


Figure 32 : Photo illustrant l'essai 4-4 portant sur une section centrale

4.6. Résultats et observations

4.6.1. Résumé des résultats

Les principaux résultats des essais statiques de la série 4 sont présentés au Tableau 5. Les graphiques des résultats obtenus sont donnés à l'annexe A-1. Des photos complémentaires sont présentées aux Figures B.3 à B.10 de l'annexe B-2.

Tableau 5: Sommaire des résultats des essais statiques

Essai	Charge maximale	Commentaires	Figures
4-1a	800 N	Rupture sous une charge de 800 N à 130 mm de l'encastrement	A.1,A.2, B.3
4.1b	700 N	Rupture sous une charge de 700 N au niveau de l'encastrement	A.3, A.4, B.4
4-1c	900 N	Rupture sous une charge de 900 N au niveau de l'encastrement	A.5, A.6, B.5
4-1supp.	900 N + 450 N	Soulèvement d'environ 25 mm	A.7, A.8, B.6
4-2		Soulèvement d'environ 3 à 5 mm du 2x4 sur le béton.	A.9,A.1O, A.11,B.7, B.8
	900 N	Soulèvement du clou d'environ 1 à 2 mm (après essai)	
4-3	900 N	Soulèvement du poteau d'extrémité d'environ 3 mm	A.12,A.13, A.14,B.9
4-4	900 N	Soulèvement d'environ 3 mm (voir photo)	A.15,A.16, A. 17, B. 10

4.6.2. Observations sur les essais de la série 4

Essais 4-1 : Essais statiques sur des montants en bois.

Tout d'abord, trois essais à la rupture ont été réalisés, pour lesquels :

- les charges de rupture ont été de 700, 800 et 900 N respectivement, avec rupture à la base près de l'encastrement ou à 130 mm au-dessus de l'encastrement.
- les déformations unitaires des fibres comprimées et tendues à l'encastrement ont atteint plusieurs milliers de micro-déformations, soit 5000 με à 7000 με. Ces grandes déformations ont résulté en une flèche importante du haut des montants, soit près de 160 mm pour les 3 essais.

Ces déformations observées sont semblables à celles que l'on calcule, pour un poteau encastré chargé au bout libre, avec un module d'élasticité de l'ordre de 7000 MPa.

Étant donné la performance inadéquate des trois premiers essais, un quatrième essai (4-Isupp.) a été réalisé. Dans cet essai, le montant était rigidifié par des goussets de contreplaqué, tel que décrit à la section 3.6 pour les garde-corps de type 1, ce qui a permis d'observer que :

- le montant a résisté aux charges appliquées soit, 900 N horizontalement et 450 N verticalement.
- le déplacement horizontal a atteint 155 mm.
- les déformations unitaires à la base du montant n'ont atteint, toutefois, que 275 με en compression et 150 με en traction.

Ces faibles déformations s'expliquent par l'effet du gousset qui reprend une partie des efforts réduisant la portion reprise par le montant, l'ensemble fonctionnant comme une section assemblée. L'ensemble ne constitue pas un encastrement rigide dû aux déformations des clous reliant les goussets de contreplaqué au montant. En effet, sous l'effet des charges croissantes, les clous se sont déformés et l'assemblage gousset-montant est passé d'encastrement rigide à un assemblage semi-rigide.

Nous voyons sur la photo de la Figure B.6d le déplacement du montant par rapport aux goussets de contreplaqué. Ce déplacement est de plusieurs millimètres.

Essai 4-2 : Essai statique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois.

Cet essai a permis de constater que :

- les déformations unitaires du montant près de la patte sont très faibles car le montant est retenu par les goussets de contreplaqué.
- les déformations de la section centrale de la lisse supérieure ont atteint 800 με, ce qui correspond à une contrainte peu élevée, correspondant environ à 20% de la contrainte ultime du bois.
- le déplacement horizontal de la section centrale de la lisse supérieure a atteint 40 mm.

Ce déplacement provient de la flexion de la lisse, de la flexion des montants et du soulèvement de 3 à 5 mm de la patte de bois fixée par des clous coincés avec un fil de fer #16. Après déchargement, un soulèvement résiduel de 1 à 2 mm indique que le système d'attache a subi une forme de glissement. La flèche verticale au centre de la lisse supérieure a été de quelques millimètres.

Essai 4-3 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps.

Cet essai a permis de constater que :

- les déformations unitaires du montant à sa base, près de la patte, sont très faibles car le montant est retenu par les goussets de contreplaqué.
- les déformations de la section centrale de la lisse supérieure ont atteint environ 800 με, ce qui correspond à une contrainte peu élevée, correspondant à environ 20% de la capacité ultime du bois.

- le déplacement horizontal de la section centrale de la lisse supérieure a atteint 45 mm. Au déchargement, un déplacement résiduel très faible de l'ordre de 3 mm a été observé, ce qui dénote un glissement dans le système d'attache.
- la flèche verticale au centre de la lisse supérieure est très faible, soit environ 10 mm.

Les déplacements de l'ensemble ont été moindres dans le système à trois baies que pour le système à une seule baie (série 4.2). Les déformations dans la lisse sont toutefois du même ordre de grandeur, comme on pouvait s'y attendre.

Essai 4-4 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps

- les déformations des poteaux de même que le déplacement horizontal de la section centrale sont très semblables à ceux de la section de rive (série 4.3).
- les déformations de la section centrale de la lisse supérieure ont atteint environ 1200 με, ce qui correspond à une contrainte peu élevée, correspondant à environ 30% de la capacité ultime du bois.
- le déplacement vertical au centre de la lisse supérieure est très faible, quelques millimètres seulement.
- le soulèvement de 3 mm de la patte sous le montant indique un glissement des ancrages.

4.7. Résultats et observations sur les essais statiques de la série 4

L'article 3.8.2 du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec, S-2.1, r.6 exige *que le garde-corps résiste à des charges de 900 N horizontale et 450 N verticale appliquées simultanément en n'importe quel point de la lisse supérieure du garde-corps.*

Nos essais montrent que les garde-corps en bois réalisés couramment sur les chantiers ne rencontrent pas toujours ces exigences. Lorsque les charges sont appliquées directement sur les montants, la charge horizontale doit être résistée par le montant seul. Lors de nos essais, les résistances à la rupture ont varié entre 700 N et 900 N, alors que l'exigence est de 900 N. Pour ces montants, deux façons de faire permettraient d'atteindre la résistance requise :

a) choisir du bois de plus grande qualité suivant la Norme CAN/CSA-086.1-M89 – Engineering Design in Wood (CAN/CSA-086.1-M89, 1989). Ceci n'est pas facilement réalisable dans les conditions courantes du marché;
b) orienter le montant de 2x4 de façon à utiliser la plus grande résistance du montant, en faisant résister la charge horizontale par la grande dimension (4 po.). Lorsque le 2x4 résiste par la grande dimension de 4 po., le module de section $S = \frac{bh^2}{6} = 50\ 166.33\ mm^3$ alors que le module de section est 21 419.33 mm^3 lorsqu'il résiste par la petite dimension de 2 po.. Le module de section est alors le double du module de section que nous avons si le 2x4 est placé avec la face de 4 po. perpendiculaire à la charge horizontale, position utilisée lors de l'essai. Puisque le 2x4 résiste déjà à environ 700 N à 900 N avec le plus

petit module de section, en l'orientant de façon à ce que le plus grand module de section résiste, nous pouvons conclure que le 2x4 résistera aisément à l'exigence de 900 N.

L'utilisation d'un assemblage mixte montant-gousset pose certains problèmes :

a) l'assemblage gousset-montant avec une rangée de clous est déformable. Le montant se déplace par rapport aux goussets. Si le montant était orienté selon son axe fort, nous pourrions utiliser 2 rangées de clous, ce qui augmenterait grandement la résistance de cette attache.
b) la fixation de la patte à la dalle avec deux clous n'est pas suffisamment rigide. Il faut utiliser au moins 3 clous.
c) lorsque la charge a été appliquée directement sur le montant, la patte s'est soulevée de 25 mm.

Lorsque la charge a été placée au centre des travées, les montants ne supportent que la moitié de la charge et le soulèvement a été alors réduit à une valeur de 3 à 5 mm.

5. SÉRIE 5 : ESSAIS DYNAMIQUES SUR DES GARDE-CORPS EN BOIS

5.1. Description des essais

Les essais dynamiques visent à simuler la chute contre un garde-corps d'un travailleur se déplaçant à reculons ou en déplacement rapide. Dans ces essais, un mannequin, constitué d'un torse en bois de 100 kg monté sur une base métallique, est déplacé sur un convoyeur à rouleaux dont la pente et la longueur permettent d'atteindre une vitesse de 2 m/s à la butée. Avec la base métallique, le centre de gravité de l'ensemble mannequin-base est situé à une hauteur de 1.05 m. Le dessus de la lisse supérieure se trouve à 1.06 m (42 po.) au-dessus du sol. Ce torse rigide et simplifié est utilisé dans les essais de normalisation des équipements de protection contre les chutes au Canada (CAN/CSA-Z259.10-M89, 1989). Il a des dimensions proches d'un travailleur nord-américain.

Les résultats de ces essais sont résumés dans des tableaux dans le corps du texte et des graphiques à l'annexe A. Des photos sont présentées à l'annexe B.

5.2. Essai 5-1 : Essai dynamique sur un montant de garde-corps en bois

Pour cet essai, le garde-corps était constitué d'une seule travée de 1.83 m de portée assemblée selon les mêmes principes que ceux utilisés pour les essais 4-3 et 4-4. L'essai a été réalisé de telle sorte que le mannequin heurtait directement le montant, selon le schéma de la Figure 33. Cet essai a permis :

- d'observer le comportement du montant en bois sous la force d'impact;
- de déterminer la capacité du montant à retenir le torse de bois sans rupture ou abandon de la charge;
- de mesurer les déplacements selon les axes *x, y* et z avec des capteurs de déplacements;
- d'effectuer des prises de vues avec la caméra à haute vitesse.

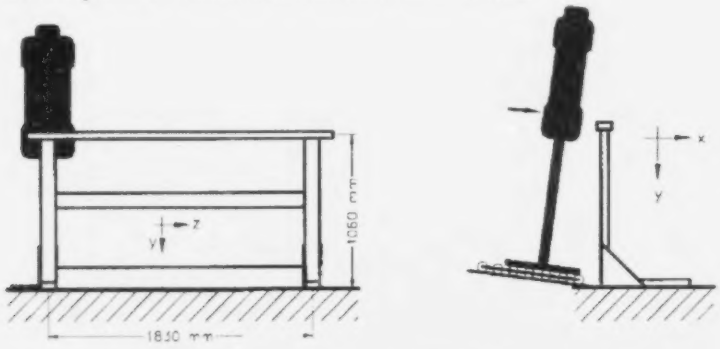


Figure 33 : Schéma de l'essai 5-1

5.3. Essai 5-2 : Essai dynamique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois

Pour cet essai, le garde-corps était constitué d'une seule travée de 1.83 m de portée assemblée selon les mêmes principes que ceux utilisés pour les essais 4-3 et 4-4. L'essai a été réalisé de telle sorte que le mannequin heurtait directement la zone centrale du garde-corps, selon le schéma illustré à la Figure 34. Cet essai a permis :

- d'observer le comportement de la section du garde-corps ancré tel qu'au chantier sous la force d'impact;
- de déterminer la capacité du garde-corps à retenir le torse de bois sans rupture ou abandon de la charge;
- de mesurer les déplacements *x*, *y* et *z* avec des capteurs de déplacements;
- de faire des prises de vues avec la caméra à haute vitesse.

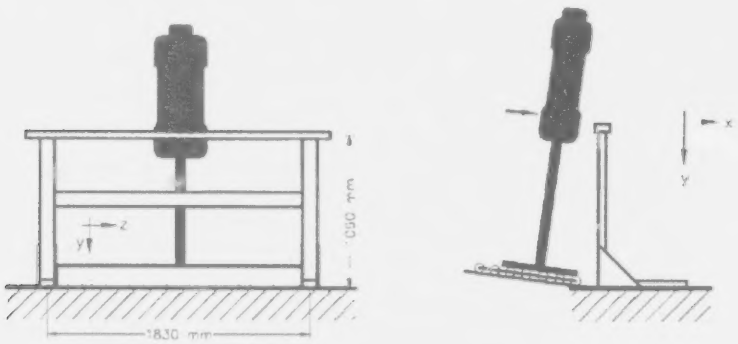


Figure 34 : Schéma de l'essai 5-2

5.4. Essai 5-3 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps en bois

Pour cet essai, le garde-corps était constitué de trois travées de 1.83 m de portée assemblées selon les mêmes principes que ceux utilisés pour les essais 4-3. L'essai a été réalisé de telle sorte que le mannequin heurtait directement la zone centrale de la lisse supérieure de la section de rive, selon le schéma illustré sur la Figure 35. Cet essai a permis :

- d'observer le comportement de la section du garde-corps ancré tel qu'au chantier sous la force d'impact;
- de déterminer la capacité du garde-corps à retenir le torse de bois sans rupture ou abandon de la charge;
- de mesurer la flèche;
- de faire des prises de vues avec la caméra à haute vitesse.

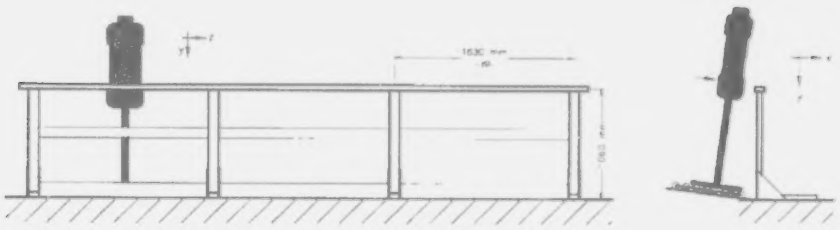


Figure 35 : Schéma de l'essai 5-3

5.5. Essai 5-4 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps

Pour cet essai, le garde-corps était constitué de trois travées de 1.83 m de portée assemblées selon les mêmes principes que ceux utilisés pour les essais 4-4. L'essai a été réalisé de telle sorte que le mannequin heurtait le milieu de la section centrale selon le schéma illustré à la Figure 36. Cet essai a permis :

- d'observer le comportement de la section du garde-corps ancré tel qu'au chantier sous la force d'impact;
- de déterminer la capacité du garde-corps à retenir le torse de bois sans rupture ou abandon de la charge;
- de mesurer la flèche;
- de faire des prises de vues avec la caméra à haute vitesse.

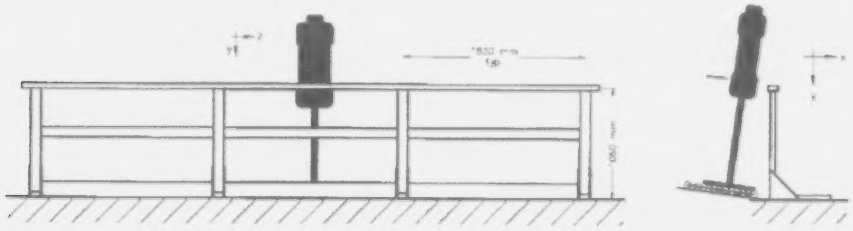


Figure 36 : Schéma de l'essai 5-4

5.6. Résultats

Le Tableau 6 résume l'essentiel des observations effectuées lors de la série d'essai 5. Les graphiques des résultats obtenus sont donnés à l'annexe A-2. On présente aux Figures B.1 1 à B.14 de l'annexe B-3 les photos relatives à ces essais.

Tableau 6 : Sommaire des résultats des essais dynamiques

Essai	Observations	Commentaires	Figures
5-1	Le mannequin bascule	- Rupture du poteau	A.18, A.19, B.11
5-2	Le mannequin bascule	- Soulèvement des poteaux d'environ 8 à 10 mm dû à un début d'arrachement des ancrages - Rupture des lisses supérieures et intermédiaires	A.20, A.21, B.12
5-3	Le mannequin est retenu	- Bris de la lisse supérieure - Soulèvement des ancrages d'environ 8 mm - Le mannequin est retenu grâce à la continuité assurée par les lisses de 12 pieds	A.23, A.24, A.25, B.13
5-4	Le mannequin est retenu	- Pas de bris - La continuité et l'humidité du bois ont joué un rôle important	A.26, A.27, A.28, B.14

5.7. Résultats et observations sur les essais dynamiques de la série 5

Essai 5-1 : Essai dynamique sur un montant de garde-corps en bois.

- L'impact est absorbé par un seul montant qui se brise sous le choc, ce qui entraîne la chute du mannequin.

Essai 5-2 .-Essai dynamique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois.

- Lors de cet essai le mannequin a basculé suite au soulèvement des pattes et au bris des lisses supérieure et intermédiaire.

Essai 5-3 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps en bois

- Dans cet essai, le mannequin a été retenu grâce à la continuité des lisses de 12 pieds. Nous notons toutefois la rupture de la lisse supérieure et le soulèvement de 8 mm des ancrages.

Essai 5-4 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps.

- Dans cet essai, aucun bris ne fut constaté. Nous attribuons ce résultat au fait que le bois de la lisse était encore vert et qu'il a absorbé le choc au lieu de se rompre.

5.7.1. Remarques

Ces essais montrent que :

- le montant devrait être orienté pour que sa résistance maximale soit utilisée: mettre la dimension de 4 po. dans le sens de la charge et celle de 2 po. perpendiculaire à la charge;
- la marge de sécurité contre le basculement n'est pas suffisante lorsqu'il n'y a qu'une travée. Les ancrages sont plus sollicités que lorsqu'il y a plusieurs travées et ils subissent un début d'arrachement. Il faudra augmenter la capacité des ancrages;
- dans l'essai sur la travée de rive, nous avons aussi noté le soulèvement des ancrages. Ceci confirme que le design et la réalisation au chantier des ancrages actuels sont inadéquats et doivent être améliorés;
- le bois utilisé dans les essais 5-1, 5-2 et 5-3 était sec contrairement à celui de l'essai 5-4, ce qui a été favorable dans ce dernier cas.

6. SÉRIE 6 : ESSAIS STATIQUES AVEC ÉTAIS MÉTALLIQUES COMME SUPPORTS

6.1. Description des essais

Sur les chantiers, les garde-corps en bois sont souvent appuyés sur des étais métalliques ajustables utilisés pour étayer les coffrages et le béton lors de la coulée des planchers. Ces étais sont coincés entre les planchers inférieur et supérieur à l'aide de plaques de contreplaqué. Leur résistance au déplacement horizontal est obtenue par la friction du contreplaqué sur le béton en serrant la vis de l'étai au maximum. Les dimensions de l'étai sont indiquées à la Figure 37.

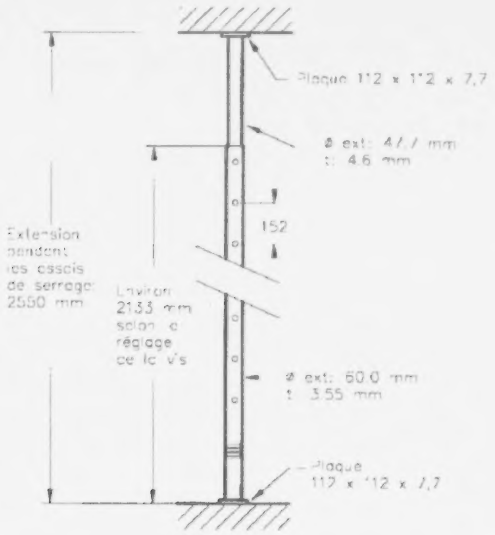


Figure 37 : Dimensions types d'un étai

Pour connaître la force dans l'étai lors du serrage, un étai a été instrumenté avec des jauges de déformations. Cet étai avait été préalablement calibré en le soumettant à des charges fournies par une presse hydraulique Amsler tel que montré sur la Figure 38.

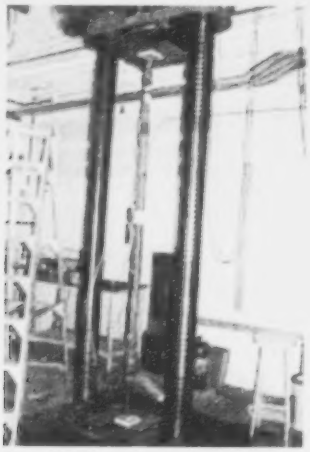


Figure 38 : Calibrage d'un étai métallique avec la presse Amsler

Les résultats du calibrage sont présentés au Tableau 7 ainsi qu'à la Figure 39.

Tableau 7 : Calibrage de l'étai

P (lbs)	P (N)	Déformation moyenne (με)
0	0	0
400	1779	22
600	2669	31
800	3559	41
1000	4448	53
1200	5338	64
1400	6228	73
1600	7117	85
1800	8007	94
2000	8896	107
2200	9786	115
2400	10676	129
2600	11565	137
2800	12455	147
3000	13345	160

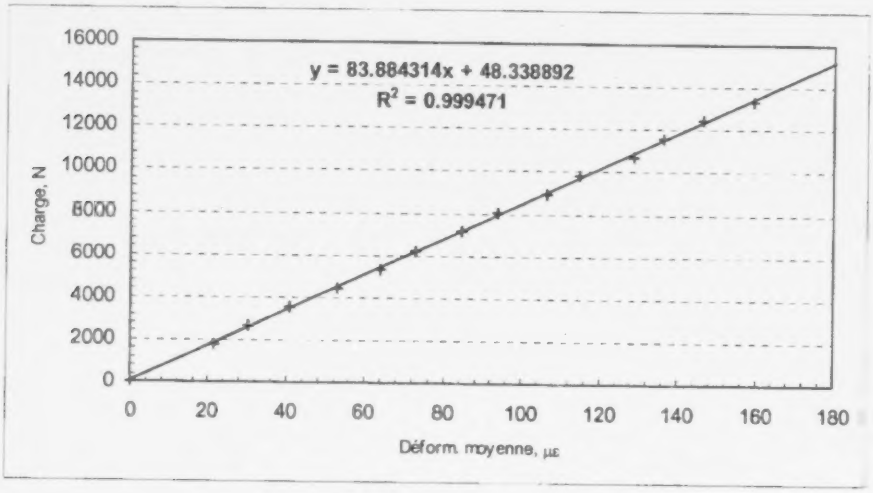


Figure 39 : Courbe de calibrage de l'étai

6.2. Essai 6-1 : Mesure de la force dans l'étai métallique selon le nombre de tours de serrage

La force dans l'étai lors du serrage est fournie par les jauges de déformation collées sur l'étai. Trois essais ont été réalisés. À l'aide d'une clé ayant un manche d'environ 300 mm (Figure 17), le technicien faisait tourner la vis de l'étai d'une fraction de tour et notait les déformations. Grâce à l'essai de calibrage, ces déformations indiquaient la force induite dans l'étai. Ce chargement progressif (pas à pas) s'est poursuivi jusqu'au blocage complet de la vis. La réalisation de ces essais est illustrée sur la Figure 40. Les résultats sont présentés à la section 6.8.

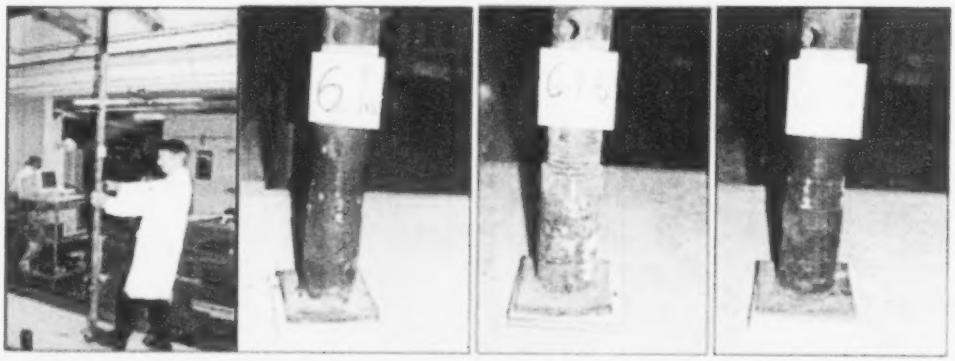


Figure 40 : Réalisation des essais 6-1a, 6-1b et 6-1c sur un étai métallique

6.3. Essai 6-2 : Détermination du coefficient de friction plaque d'appui-béton

Trois essais ont été réalisés selon le schéma montré à la Figure 41 pour mesurer le coefficient de friction des plaques de contreplaqué sur le béton. L'étai était initialement serré au maximum et une force croissante horizontale était appliquée au pied de l'étai jusqu'à obtenir un début de glissement (Figure 42).

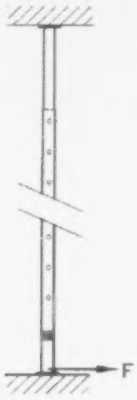


Figure 41 : Schéma de l'essai 6-2

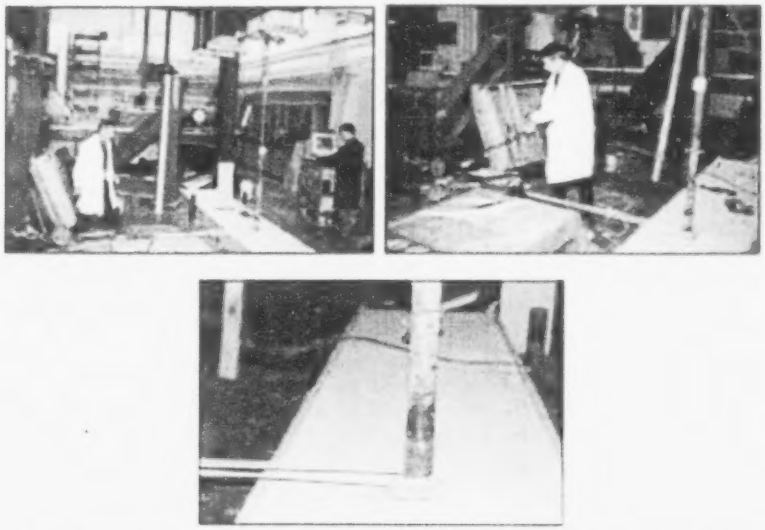


Figure 42 : Mesure du coefficient de friction de l'étai sur la dalle pour l'essai 6-2

Le coefficient de friction du contreplaqué sur le béton μ est calculé en faisant le rapport de la charge horizontale maximale F (Figure 41) à la force de blocage de l'étai. Les résultats sont présentés à la section 6.8.

6.4. Essai 6-3 : Essai statique sur un montant

Une charge horizontale de 900 N et une charge verticale de 450 N ont été appliquées simultanément à une hauteur de 1.20 m sur un étai métallique installé tel qu'au chantier. Trois essais ont été réalisés selon le schéma montré sur la Figure 43. Cet essai a permis:

- de mesurer la flèche pour tracer la courbe force - déformation;
- d'observer le comportement du montant sous charge;
- de mesurer la flèche sous une charge horizontale de 900 N.

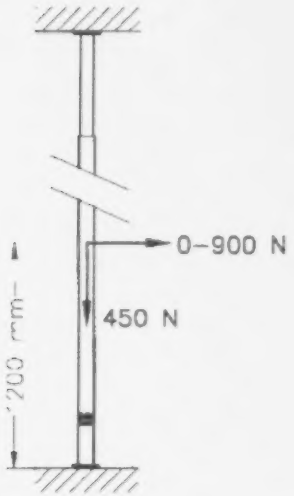


Figure 43 : Schéma de l'essai 6-3

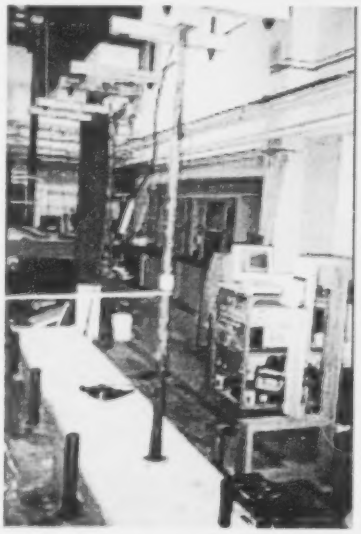


Figure 44 : Essai statique sur un montant (essai 6-3)

La Figure 44 présente la réalisation des essais. Les résultats sont présentés à la section 6.8.

6.5. Essai 6-4 : Essai statique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois

L'essai a été réalisé en appliquant une charge verticale de 450 N et une charge horizontale croissante de 0 à 900 N à la section centrale de la lisse supérieure, tel qu'illustré à la Figure 45.

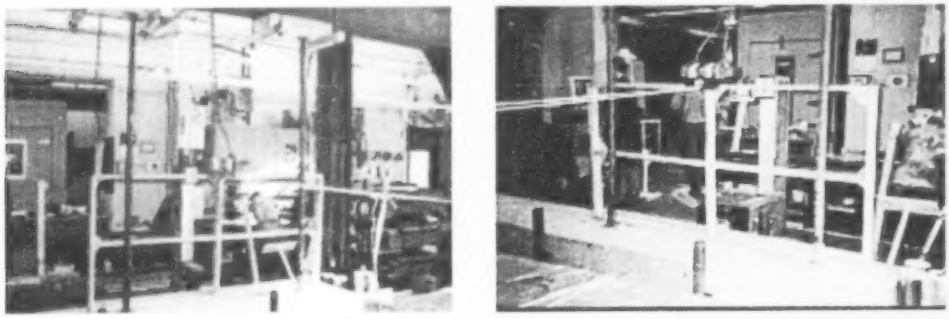


Figure 45 : Essai statique sur un garde-corps en bois

Pour cet essai et les essais suivants (6-5 et 6-6), un garde-corps en bois préfabriqué qui avait les dimensions montrées à la Figure 46 a été utilisé.

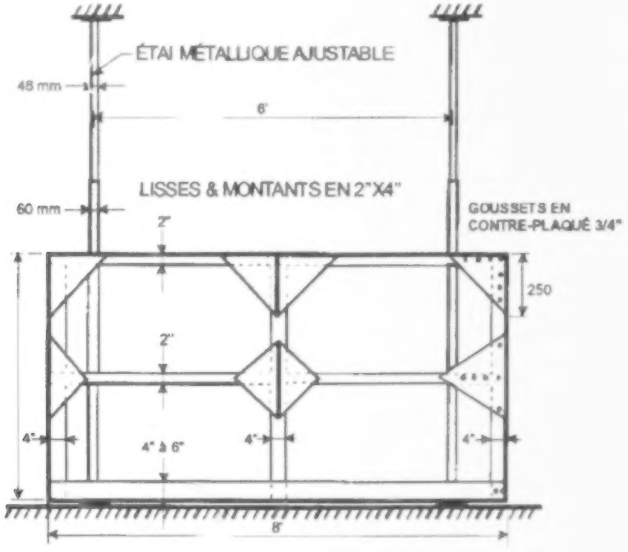


Figure 46 : Garde-corps attaché aux étais avec un fil de fer no 16

Cet essai a permis:

- de mesurer la flèche.
- d'observer le comportement de la section du garde-corps sous charge.
- de mesurer la contrainte maximale à mi-portée de la lisse par une jauge de contrainte.

Les résultats sont présentés à la section 6.8.

6.6. Essai 6-5 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps

Une charge horizontale de 900 N et une charge verticale de 450 N ont été appliquées simultanément à mi-portée de la lisse supérieure d'une section de rive (gauche ou droite) d'une suite de trois sections de garde-corps ancré tel qu'au chantier. Cet essai a été réalisé comme l'essai 6-4 en utilisant des garde-corps en bois types appuyés et attachés à des étais en acier espacés de 6 pieds (Figure 47).

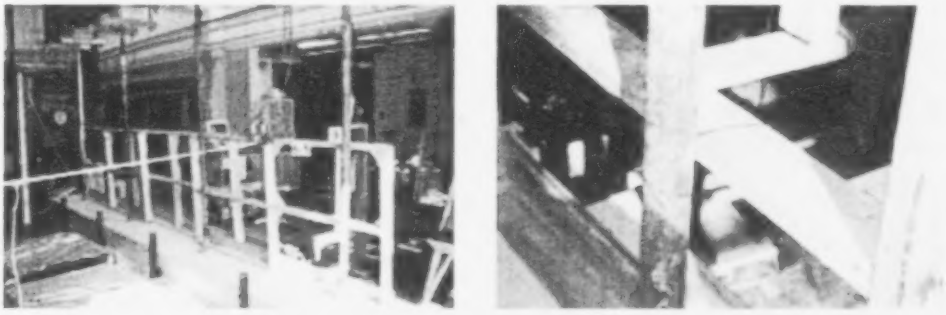


Figure 47 : Essai statique de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps (essai 6-5)

Cet essai a permis :

- de mesurer la flèche.
- d'observer le comportement de la section du garde-corps sous charge.
- de mesurer la contrainte maximale à mi-portée de la lisse par une jauge de contrainte.

Les résultats sont présentés à la section 6.8.

6.7. Essai 6-6 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps

Une charge de 900 N horizontale et une charge de 450 N verticale ont été appliquées simultanément à mi-portée de la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps ancré tel qu'au chantier.

Cet essai a été réalisé comme l'essai 6-5 en utilisant des garde-corps types appuyés et attachés à des étais en acier espacés de 1.83 m (6 pi), tel que montré à la Figure 48. Comme les garde-corps ont 2.4 m de longueur (8 pi), il y a un chevauchement des garde-corps d'environ 300 mm, tel que montré à la Figure 49.

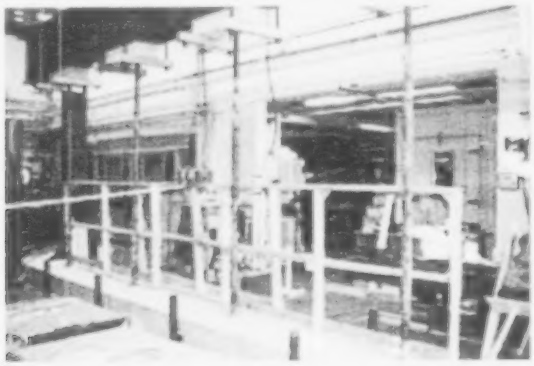


Figure 48 : Essai statique de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps (essai 6-6)

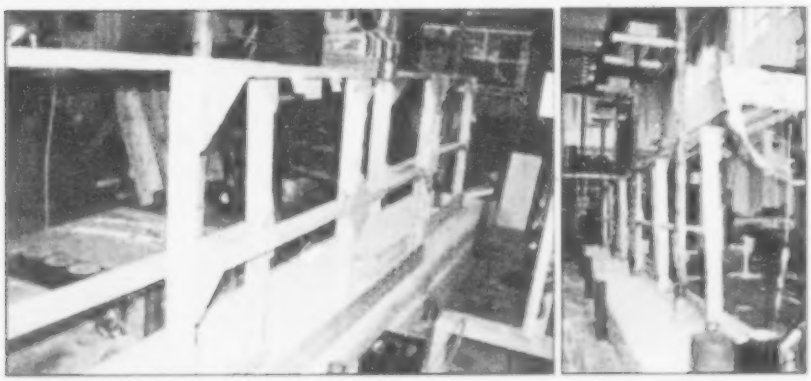


Figure 49 : Chevauchement des sections de garde-corps (essai 6-6)

Cet essai a permis :

- de mesurer la flèche.
- d'observer le comportement de la section du garde-corps sous charge.
- de mesurer la contrainte maximale à mi-portée de la lisse par une jauge de contrainte.

Les résultats sont présentés à la section 6.8.

6.8. Résultats et observations sur les essais statiques de la série 6

Le sommaire des résultats de tous ces essais est présenté au Tableau 8. Les graphiques sont présentés à l'annexe A-3 alors que les photos sont présentées à l'annexe B-4.

- Les essais 6-la, 6-lb et 6-lc ont permis d'établir la force qui peut être induite dans un étai serré jusqu'à blocage entre 2 planchers en béton. En utilisant un étai instrumenté et calibré, nous avons mesuré qu'un technicien muni d'une clé de 300 mm arrivait à introduire des forces de 18 à 20 kN, que la vis de l'étai soit sèche ou huilée.
- La force de friction d'un étai bloqué au maximum a été mesurée entre 6.9 et 8.8 kN, ce qui a permis d'établir un coefficient de friction contreplaqué-béton de $\mu = 0.44$ à 0.49.
- Les déplacements en fonction de la charge appliquée dans le sens de la charge horizontale (direction *x*), dans le sens vertical (direction *y*) et selon le sens longitudinal du garde-corps (direction z) ont été rapportés sur les Figures A.29 à A.36 inclusivement.
- Les déplacements les plus importants, de l'ordre de quelques millimètres, se sont produits dans la direction *x* et sont principalement dus à la reprise du jeu entre les tubes mâle et femelle de l'étai et à la flexion de la lisse supérieure.

6.8.1. Remarques

Un garde-corps doit supporter une poussée horizontale de 900 N et une charge verticale de 450 N. La sollicitation maximale est obtenue lorsque ces charges sont placées au centre du garde-corps. Ce dernier a un montant en son centre et il résiste aisément à la charge verticale. La charge horizontale de 900 N est résistée par les 2 étais. Ces derniers peuvent résister, à cause du serrage appliqué, à au moins 6.9 kN chacun avant de glisser. Cette résistance est plus de 10 fois la charge appliquée.

Tableau 8 : Résultats des essais de la série 6

Essai	Charge maximale	Commentaires	Figures
6-1a	C = 20.3 kN	Serrage avec vis huilée	B.15a)
6-1b	C = 18.1 kN	Serrage avec vis sèche	B.15b)
6-1c	C = 18.6 kN	Serrage avec vis légèrement huilée	B.15c)
6-2a	V = 14.8 kN H = 6.5 kN	Serrage avec vis sèche μ= 0.44	B.16
6-2b	V = 16.78 kN H = 8.3 kN	Serrage avec vis sèche μ= 0.49	B.16
6-2c	V = 19.5 kN H = 8.8 kN	Serrage avec vis légèrement huilée μ= 0.45	B.16
6-3	900 N horizontal 450 N vertical	- Aucun déplacement des bases - Déplacement vers 800 N de 2 mm dû à la reprise du jeu entre les tubes mâles et femelles - Serrage max. 9/16 de tours - Vis sèche (où la force est appliquée) - Vis huilé (base) - Force verticale appliquée à 41½ po. du bas	A.29 et B.17
6-4	900 N horizontal 450 N vertical	- Pas de glissement, pas de bris - Mesure des déformations verticales à 47½ po. du bas - Serrage max. : poteau à droite : ¼ tours poteau à gauche : ⅞ de tour - Force verticale appliquée à 47½ po. du bas	A.30 et B.18
6-5	900 N horizontal 450 N vertical	- Pas de glissement - Pas de déformation - Serrage des poteaux, de gauche à droite # tours filetage 1 1⅛ Sec 2 3 1⅛ Huilé 4 ⅞ Sec - Force verticale appliquée à 47½ po. du bas	A.31, A.32, A.33 Et B.19
6-6	900 N horizontal 450 N vertical	- Pas de glissement - Pas de déformation - Serrage des poteaux, de gauche à droite # tours filetage 1 ⅞ Huilé 2 ⅝ Sec 3 ¼ Sec 4 ⅞ Huilé	A.34, A.35, A.36 Et B.20

7. SÉRIE 7 : ESSAIS DYNAMIQUES AVEC LES ÉTAIS MÉTALLIQUES COMME SUPPORTS

7.1. Description des essais

Les essais dynamiques visent à simuler la chute contre un garde-corps d'un travailleur se déplaçant à reculons ou en déplacement rapide. Dans ces essais, un mannequin, constitué d'un torse en bois de 100 kg monté sur une base métallique, est déplacé sur un convoyeur à rouleaux dont la pente et la longueur permettent d'atteindre une vitesse de 2 m/s à la butée. Avec la base métallique, le centre de gravité de l'ensemble mannequin-base est situé à une hauteur de 1.05 m. Le dessus de la lisse supérieure se trouve à 1.06 m (42 po.) au-dessus du sol. Ce torse rigide et simplifié est utilisé dans les essais de normalisation des équipements de protection contre les chutes au Canada (CAN/CSA-Z259.10-M89, 1989). Il a des dimensions proches d'un travailleur nord-américain.

Les résultats de ces essais sont résumés dans des tableaux dans le corps du texte et des graphiques à l'annexe A-4. Des photos sont présentées à l'annexe B-5.

7.2. Essai 7-1 : Essai dynamique sur un étai métallique

L'essai a été réalisé de telle sorte que le mannequin heurtait directement l'étai selon le schéma montré sur la Figure 50. Cet essai a permis :

- d'observer le comportement de l'étai métallique ancré tel qu'au chantier sous la force d'impact;
- de déterminer la capacité de l'étai à retenir le torse de bois sans rupture ou abandon de la charge;
- de mesurer les déplacements selon *x*, *y* et z avec des capteurs de déplacement;
- de faire des prises de vues avec la caméra à haute vitesse.

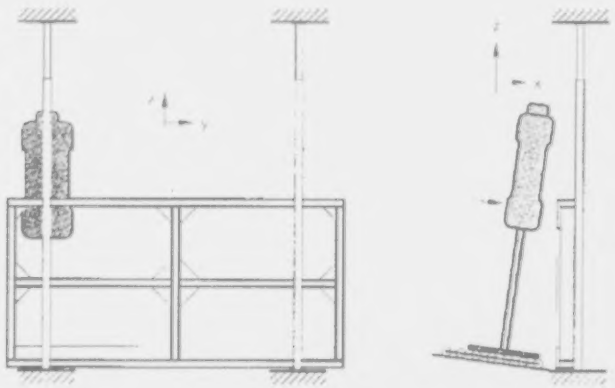


Figure 50 : Schéma de l'essai 7-1

7.3. Essai 7-2 : Essai dynamique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois

Le garde-corps utilisé dans cet essai était analogue à celui illustré à la Figure 46. L'essai a été réalisé de telle sorte que le mannequin heurtait la zone centrale du garde-corps selon le schéma montré à la Figure 51. Cet essai a permis :

- d'observer le comportement de la section du garde-corps ancré tel qu'au chantier sous la force d'impact;
- de déterminer la capacité du garde-corps à retenir le torse de bois sans rupture ou abandon de la charge;
- de mesurer les déplacements selon *x*, *y* et *z* avec des capteurs de déplacements;
- de faire des prises de vues avec la caméra à haute vitesse.

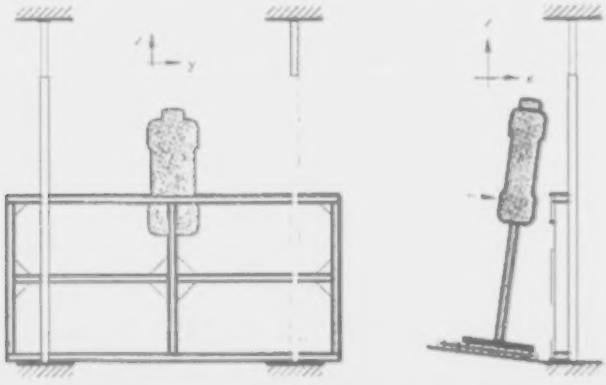


Figure 51 : Schéma de l'essai 7-2

7.4. Essai 7-3 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps

Cet essai a été réalisé sur un garde-corps constitué de 3 sections espacées de 1.83 m chacune, dont la géométrie était analogue à celle illustrée à la Figure 46. Le mannequin heurtait la zone centrale de la lisse supérieure de la section de rive, selon le schéma montré à la Figure 52. Cet essai a permis :

- d'observer le comportement de la section du garde-corps sous la force d'impact;
- de déterminer la capacité du garde-corps à retenir le torse de bois sans rupture ou abandon de la charge;
- de mesurer la flèche;
- de faire des prises de vues avec la caméra à haute vitesse.

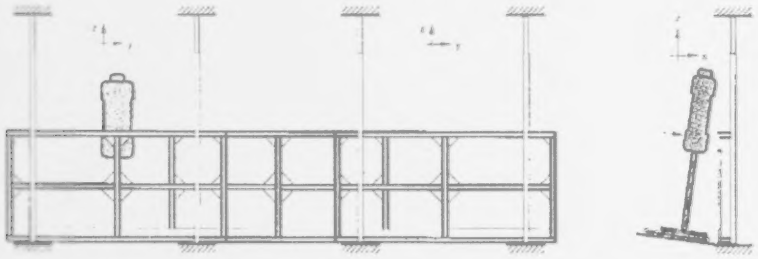


Figure 52 : Schéma de l'essai 7-3

7.5. Essai 7-4 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps

L'essai a été réalisé de telle sorte que le mannequin heurtait le milieu de la section centrale selon le schéma montré sur la Figure 53. Cet essai a permis :

- d'observer le comportement de la section du garde-corps ancré tel qu'au chantier sous la force d'impact;
- de déterminer la capacité du garde-corps à retenir le torse de bois sans rupture ou abandon de la charge;
- de mesurer la flèche;
- de faire des prises de vues avec la caméra à haute vitesse.

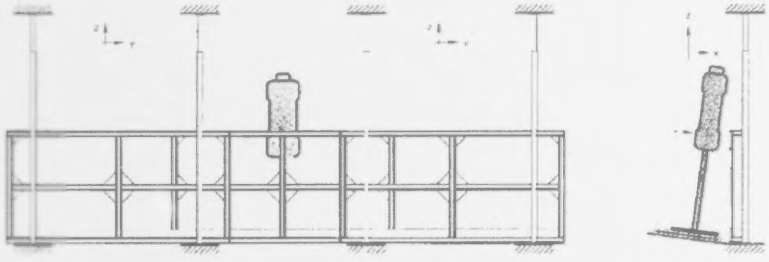


Figure 53 : Schéma de l'essai 7-4

7.6. Résultats et observations sur les essais dynamiques de la série 7

Le sommaire des résultats de tous ces essais est présenté au Tableau 9. Les graphiques sont présentés à l'annexe A-4 alors que les photos sont présentées à l'annexe B-5.

Tableau 9 : Résultats des essais de la série 7

Essai	Charge maximale	Commentaires	Figures
7-1	L'étai ne bouge pas	Serrage du poteau de gauche à droite Poteau 1 : Tours ½ : Filetage sec Poteau 2 : Tours ¾ : Filetage huilé	A.37, A.38 et B.21
7-2	Le mannequin est retenu	- Bris dans le 2x4 de la lisse supérieure (bois sec) - Vérification du serrage = pas de perte Serrage poteau de gauche à droite Poteau 1 : Tours ⅝ : Filetage sec Poteau 2 : Tours ⅞ : Filetage légèrement huilé	A.39, A.40, A.41 et B.22
7-3	Le mannequin est retenu	- Pas de bris - Très légère perte de serrage sur les poteaux 2-3-4 non quantifiable - Serrage poteau de gauche à droite Poteau 1 : Tours ⅞ : Filetage légèrement huilé Poteau 2 : Tours ⅝ : Filetage sec Poteau 3 : Tours 1 : Filetage sec Poteau 4 : Tours 1 : Filetage légèrement huilé	A.42, A.43, A.44 et B.23
7-4	Le mannequin est retenu	- Bris des rouleaux et du mannequin - Serrage poteau de gauche à droite Poteau 1 : Tours ⅞ : Filetage légèrement huilé Poteau 2 : Tours ⅝ : Filetage sec Poteau 3 : Tours 1 : Filetage sec Poteau 4 : Tours 1 : Filetage légèrement huilé	A.45, A.46, A.47 et B.24

7.6.1. Remarques

Essai 7-1 : Essai dynamique sur un étai métallique

L'étai étant bien coincé entre les dalles supérieure et inférieure, il peut résister à une force horizontale de l'ordre de 15 à 19 kN (voir essais 6-2), ce qui est nettement supérieur à la force d'impact générée par le mannequin ayant une masse de 100 kg.

Essais 7-2, 7-3 et 7-4 - : Essais sur la lisse supérieure de garde-corps.

Lors de ces essais, la lisse supérieure étant plus haute que le centre de gravité, il n'y a pas eu de basculement du mannequin. Ce dernier a été bien retenu par le garde-corps en bois qui avait la résistance voulue et qui a bien résisté. Les étais étaient suffisamment coincés entre les dalles supérieure et inférieure, il n'y a donc pas eu déplacement des étais.

8. SÉRIE 8 : ESSAIS DE BASCULEMENT AVEC LISSE FAITE DE DIFFÉRENTS MATÉRIAUX

8.1. Description des essais

Les essais dynamiques visent à simuler la chute contre un garde-corps d'un travailleur se déplaçant à reculons ou en déplacement rapide. Dans ces essais, un mannequin, constitué d'un torse en bois de 100 kg monté sur une base métallique, est déplacé sur un convoyeur à rouleaux dont la pente et la longueur permettent d'atteindre une vitesse de 2 m/s à la butée. Avec la base métallique, le centre de gravité de l'ensemble mannequin-base est situé à une hauteur de 1.05 m. Le dessus de la lisse supérieure se trouve à 1.06 m (42 po.) au-dessus du sol. Ce torse rigide et simplifié est utilisé dans les essais de normalisation des équipements de protection contre les chutes au Canada (CAN/CSA-Z259.10-M89, 1989). Il a des dimensions proches d'un travailleur nord-américain.

Cet essai a permis :

- d'observer l'état des lisses supérieures;
- de voir le comportement du mannequin;
- de mesurer les déplacements dans le sens x (dans le sens du mouvement du mannequin, dans le sens z (axe longitudinal des lisses) et y (déplacement vertical);
- de faire des prises de vues avec la caméra à haute vitesse.

Le sommaire des résultats des essais est donné au Tableau 10. Les résultats de ces essais sont présentés sur des graphiques à l'annexe A-5. Des photos sont présentées à l'annexe B-6.

8.2. Essai 8-1 : Essais de basculement avec une lisse supérieure de bois

Trois essais ont été réalisés en utilisant un garde-corps en bois maintenu au sol par des pattes fixées à l'aide de clous et de fil de fer dans la dalle de béton, tels que décrits à la section 3.6. Le garde-corps comportait une plinthe, une lisse intermédiaire en 2x4 et une lisse supérieure en 2x4 fixée aux 2 montants. Sur le dessus de la lisse supérieure, nous avons cloué un autre 2x4 orienté de telle sorte qu'il résiste avec son axe fort (dans le sens du 4 pouces) au choc appliqué par le mannequin en mouvement.

Lors de ces essais, nous avons fait varier la hauteur des montants de la façon suivante :

- essai 8-la —» hauteur du montant : 1.1 m
- essai 8-lb —» hauteur du montant : 1.0 m
- essai 8-lc —» hauteur du montant : 0.9 m

8.3. Essai 8-2 : Essai de basculement avec une lisse supérieure flexible (câble de polypropylène)

Trois essais ont été réalisés sur un garde-corps constitué de 2 étais métalliques coincés entre 2 planchers de béton et d'un câble de polypropylène de ¾ pouce de diamètre placé à différentes hauteurs, soit :

- essai 8-2a —» câble placé à 1.1 m
- essai 8-2b —» câble placé à 1.0 m
- essai 8-2c —» câble placé à 0.9 m

8.4. Essai 8-3 : Essai de basculement avec une lisse supérieure faite d'un câble en acier de $^1/_2$ po.

Trois essais ont été réalisés sur un garde-corps constitué de 2 étais en acier coincés entre 2 planchers de béton et d'un câble en acier de ½ po placé à différentes hauteurs, soit :

- essai 8-3a : câble placé à 1,1 m
- essai 8-3b : câble placé à 1,0 m
- essai 8-3c : câble placé à 0,9 m

8.5. Résultats et observations sur les essais de basculement de la série 8

Le sommaire des résultats de tous ces essais est présenté au Tableau 10. Les graphiques sont présentés à l'annexe A-5 alors que les photos sont présentées à l'annexe B-6.

Tableau 10 : Sommaire des résultats de la série 8

Essai	Observations	Commentaires (mode de rupture, observation)	Figures
8-1a	Le mannequin est retenu	- Pas de bris – Montant de 1.1 m - Soulèvement des pattes de poteau (ancrage) de 8 à 10 mm	A.48, A.49, B.25
8-1b	Le mannequin est retenu	- Pas de bris – Montant de 1.0 m - Soulèvement des pattes de poteaux de 8 à 18 mm	A.50, A.51, A.52, B.26
8-1c	Le mannequin bascule	- Pas de bris – Montant de 0.9 m - Soulèvement des pattes de poteaux de 0 à 3 mm	A.53, A.54, A.55, B.27
8-2a	Le mannequin est retenu	- Hauteur du câble de polypropylène : 1.1 m	A.56, A.57 A.58, B.28
8-2b	Le mannequin bascule	- Hauteur du câble de polypropylène : 1.0 m	A.59, A.60 A.61, B.29
8-2c	Le mannequin bascule	- Hauteur du câble de polypropylène : 0.9 m	A.62, A.63 A.64, B.30
8-3a	Le mannequin est retenu	- Hauteur du câble d'acier : 1.1 m	A.65, A.66 A.67, B.31
8-3b	Le mannequin est retenu	- Hauteur du câble d'acier : 1.0 m	A.68, A.69 A.70, B.32
8-3c	Le mannequin bascule	- Hauteur du câble d'acier : 0.9 m	A.71, A.72 A.73, B.33

8.6. Remarques

Essai 8-1 : Essais de basculement avec une lisse supérieure en bois.

Lors des essais 5.2 et 5.3, la lisse supérieure, formée d'un seul 2x4, s'était rompue. Pour les essais de la série 8, nous avons renforcé la lisse supérieure en ajoutant un deuxième 2x4. Cet ajout s'est avéré suffisant, car aucune lisse n'a cédé. Par contre, nous notons toujours des soulèvements de 8 à 18 mm des pattes du garde-corps, ce qui confirme que ce genre d'ancrage n'est pas assez résistant. Le mannequin a été retenu lorsque la lisse supérieure était à 1.1 ou 1 mètre du sol. Par contre, lorsqu'elle se trouvait à 0.9 mètre, le mannequin a basculé.

Essai 8-2 : Essais de basculement avec une lisse supérieure flexible (câble de polypropylène).

Lorsque le câble de polypropylène était à 1.1 mètre du sol, le mannequin a été retenu. Toutefois, lorsqu'il était placé à 1.0 mètre ou 0.9 mètre, le mannequin a basculé par-dessus le câble dont les nœuds ont glissé, surtout lors de l'essai 8-2c.

Essai 8-3 : Essais de basculement avec une lisse supérieure faite d'un câble en acier de ½ po.

Lorsque le câble d'acier est à une hauteur de 1.0 et 1.1 mètres, le mannequin est retenu. Lorsqu'il est placé à 0.9 mètre, plus bas que le centre de gravité du mannequin, celui-ci bascule par-dessus le câble.

9. COMPARAISON DES EXIGENCES DE RÉSISTANCE DES RÈGLEMENTS ET DES NORMES INTERNATIONAUX

Tel qu'illustrées au Tableau 1, les exigences de résistance des règlements et normes internationaux diffèrent. Pourtant, les mécanismes de prévention et/ou d'arrêt de chute par un garde-corps sont les mêmes universellement. Dans ce contexte, quel document reflète la réalité et quel document faut-il utiliser pour vérifier la résistance d'un garde-corps? C'est une question difficile à répondre. En calculant les sollicitations qu'engendrent les exigences de résistance de principaux documents dans les membrures du garde-corps par les formules classiques de la résistance des matériaux, nous pourrons dégager quelques éléments de réponses à cette question. Comme l'étude s'adresse principalement aux garde-corps fabriqués et installés à pied d'œuvre sur les chantiers du Québec, nous limiterons la comparaison aux règlements du Québec (S-2.1, r.6 et le RSST) et à un autre document représentatif, soit OSHA.

Les cas de chargement les plus critiques sont les suivants :

- cas de charge 1 : Les charges horizontale H et verticale P agissent sur le montant.
- cas de charge 2 : Les charges horizontale H et verticale P agissent à mi-portée de la lisse supérieure.

Les principaux documents de référence en résistance de matériaux se limitent à l'étude des charpentes planes, chargées dans leurs plans. Or, les exigences de résistance comportent une force horizontale H perpendiculaire au plan du garde-corps et une force verticale P dans le plan de garde-corps qui s'appliquent simultanément ou non, à n'importe quel point de la lisse supérieure. La modélisation du garde-corps pose aussi problème. Comme observé lors des essais en laboratoire, les appuis des montants ne sont ni des appuis rotulés ni des appuis parfaitement encastrés. L'étude d'un garde-corps revient a étudier un portique de plusieurs travées aux montants encastrés partiellement, sollicité par un chargement dans le plan du portique et un chargement perpendiculaire au portique. Manifestement, la résolution d'une telle structure, sollicitée par un chargement tridimensionnel est laborieuse, complexe et requiert un logiciel d'analyse de structures. Afin de simplifier, nous ramenons l'étude comparative des exigences de résistance sur un garde-corps à l'étude d'un portique à deux montants encastrés. Nous calculerons les sollicitations dans les membrures du portique en superposant les sollicitations dues aux chargements plan et perpendiculaire au plan. Cette hypothèse, même si elle n'est pas réaliste, permet d'utiliser les formules classiques de la résistance des matériaux du portique à deux montants encastrés pour comparer les exigences de résistance de S-2.1, r.6, du RSST et de OSHA.

9.1. Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec (S-2.1, r.6) - Cas de charge 1

Les charges horizontale H et verticale P agissent sur le montant de hauteur M. En faisant a = 0 dans les formules du portique aux montants encastrés de l'annexe C, l'étude du portique bi-encastré revient à l'étude d'un montant encastré sollicité par les charges P et H. La force H, horizontale et perpendiculaire au portique et la force P, verticale et dans le plan du portique, engendrent de la flexion composée dans le montant (Figure 54).

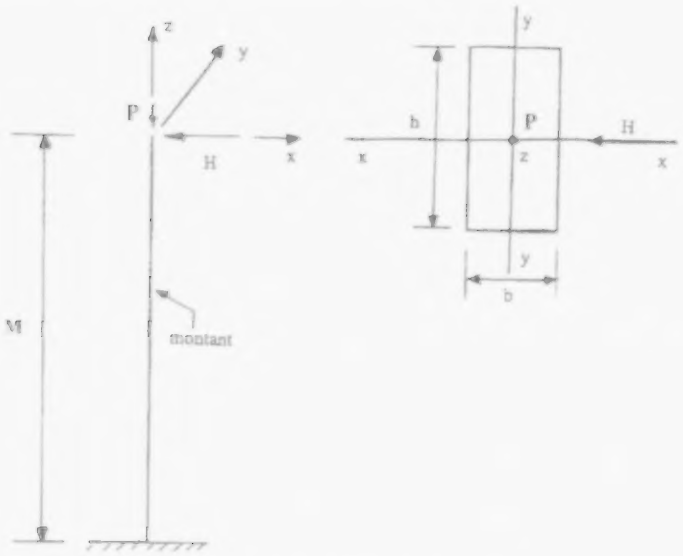


Figure 54 : Sollicitations au montant

D'après l'article *3.8.2. Résistance* de S-2.1, r.6 :
Suivant l'axe x, H = 900 N
Suivant l'axe z, P = 450 N

Les garde-corps en bois seront vérifiés suivant la Norme CAN/CSA-086.1-M89 – Engineering Design in Wood – Limit State Design (CAN/CSA-086.1-M89, 1989)

9.1.1. Vérification du montant du garde-corps d'après CAN/CSA-086.1-M89

Avec la notation de CAN/CSA-086.1-M89 (CAN/CSA-086.1-M89, 1989), les efforts pondérés sollicitant la base du montant sont :

Effort de compression pondéré suivant z, $P_{fz} = \alpha_D P = 1.25x450 = 562.5$ N
Effort tranchant pondéré suivant x $V_{fx} = H_f = \alpha_D H = 1.25x900 = 1125$ N
Moment fléchissant pondéré suivant y $M_{fy} = MH_f = 1200x1125 = 1\,350\,000$ N.mm

De la Table "Joist Selection Tables du Wood Design Manual" (CAN/CSA-086.1-M89, 1989), pour un 38 mmx89 mm (2x4 nominale) S-P-F No1./No.2 isolé, résistant suivant l'inertie forte, nous avons :

Moment résistant pondéré (grande inertie) $M_{rx} = 0.906$ kN.m
Effort tranchant résistant pondéré $V_r = 3.45$ kN
Résistance à la compression pondérée $P_r = 28.1$ kN
Pour un 38 mm x 89 mm (2x4 nominale)

Module de section $S_{xx} = \frac{bh^2}{6} = \frac{38 \times 89^2}{6} = 50166.33 mm^3$

Module de section $S_{yy} = \frac{hb^2}{6} = \frac{89 \times 38^2}{6} = 21419.33 mm^3$

$$\frac{S_{yy}}{S_{xx}} = \frac{21419.33}{50166.33} = 0.427$$

Moment résistant pondéré (petite inertie) $M_{ry} = M_{rx} \frac{S_{yy}}{S_{xx}} = 0.906x0.427 = 0.387$ kN.m

$V_r = 3.45$ kN ≥ 1.125 kN *Acceptable*
$P_r = 28.1$ kN

Article 6.5.12 du CAN/CSA-086.1-M89

Pour une membrure soumise à la flexion composée :

$$\frac{P_{fz}}{P_r} + \frac{M_{fy}}{M_{ry}} \leq 1$$

$$\frac{562.5}{28100} + \frac{1350000}{387000} = 3.508 \geq 1$$ *Pas acceptable*

En orientant le 2x4 de façon à ce que la plus grande dimension de 4 pouces résiste, nous avons :

$$\frac{562.5}{28100} + \frac{1350000}{906000} = 1.51 \geq 1$$ *Pas acceptable*

Donc le 38 mm x 89 mm (2x4 nominale) S-P-F No.1/No.2 (CAN/CSA-086.1-M89, 1989) n'est pas adéquat comme montant même si la grande dimension de 4 pouces est orientée pour résister

aux charges de 900 N horizontale et 450 N verticale telles que stipulées par l'article 3.8.2 du S-2.1, r.6.

Considérons un 38x89 Select Structural S-P-F :
Moment résistant pondéré (grande inertie) M_{rx} = 1.27 kN.m
Moment résistant pondéré (petite inertie) M_{ry} = 1.27 x 0.427 = 0.542 kN.m
Effort tranchant résistant pondéré V_r = 3.45 kN
Résistance à la compression pondérée P_r = 28.1 kN

En orientant le 2x4 de façon à ce la plus grande de 4 pouces résiste au moment, nous avons :

$$\frac{562.5}{28100}+\frac{1350000}{1270000}=1.08\geq 1$$ *Pas acceptable*

C'est encore pas acceptable, mais nous pouvons tolérer ce léger écart puisque nous avons pris une hauteur maximale de 1200 mm pour le montant. Par conséquent, nous devons utiliser un 38 mm x 89 mm (2x4 nominale) S-P-F Select Structural comme montant et orienté de façon à ce que la grande dimension de 4 pouces résiste. Ces calculs confirment les résultats de la série 4, à savoir que le montant seul ne résiste pas aux charges de 900 N horizontale et 450 N verticale telles que stipulées par l'article 3.8.2 du Code. Il faut prévoir des goussets en contre-plaqué ou une jambe de force en 2x4.

9.1.2. Exigences du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec (S-2.1, r.6) - Cas de charge 2

La charge H, perpendiculaire au plan et la charge verticale P, dans le plan du portique, agissent à mi-portée de la lisse supérieure. Lorsque le montant est placé avec la plus petite section de 2 pouces qui résiste au moment, nous avons avec les formules du portique aux montants encastrés de l'annexe C :

Charge P dans le plan du portique

k = 0.12

Pour ce cas de charge, a = b = $\frac{L}{2}$

$$R_A = R_D = \frac{P}{2}$$

$$H_A = H_D = \frac{3PL}{8M(k+2)} = \frac{3\times P\times 1.83}{8\times 1.2\times(0.12+2)} = 0.27P$$

$$\alpha = \frac{\frac{1}{2}L}{L} = 0.5$$

$$M_A = \frac{Pab}{2L}\frac{5k-1+2\alpha(k+2)}{(k+2)(6k+1)} = \frac{P\times 0.5\times 1.83\times 0.5\times 1.83}{2\times 1.83}\times\frac{5\times 0.12-1+2\times 0.5(0.12+2)}{(0.12+2)(6\times 0.12+1)} = 0.11P$$

$M_D = M_D$ = 0.11P

$M_B = M_A - H_A M$
$M_C = M_D - H_D M$

$$M_P = M_A - H_A M + R_A a = 0.11P - 0.27P \times 1.2 + \frac{P}{2} \times \frac{1.83}{2} = 0.24P$$

La charge H, perpendiculaire au portique, agit le long de l'axe x. Elle engendre les sollicitations suivantes dans le portique :

- aux appuis des montants, deux réactions égales H/2 et opposées à H le long de l'axe x;
- un moment fléchissant à la base du montant porté par l'axe y, $M_y = MH/2$;
- un moment fléchissant à mi-portée de la lisse supérieure porté par l'axe z, $M_z = HL/4$

Superposition de P et H

La superposition de P et H donne à la base du montant les sollicitations suivantes :

Effort de compression pondéré	$P_{fz} = \alpha_D R_A = \alpha_D P/2 = 1.25 \times 450/2 = 281.25$ N
Effort tranchant pondéré	$V_{fx} = H_f/2 = \alpha_D H/2 = 1.25 \times 900/2 = 562.5$ N
Moment fléchissant pondéré suivant x	$M_{fx} = 1.25 \times 0.11P = 1.25 \times 0.11 \times 450 = 61\,875$ N.mm
Moment fléchissant pondéré suivant y	$M_{fy} = 1.25MH/2 = 1.25 \times 1.2 \times 900/2 = 675000$ M.mm

À mi-portée de la lisse supérieure :

Moment fléchissant pondéré suivant x,	$M_{fx} = \alpha_D M_P = 1.25 \times 0.24P = 1.25 \times 0.24 \times 450 \times 10^3$ = 135 000 N.mm
Moment fléchissant pondéré suivant z,	$M_{fz} = \alpha_D HL/4$ = 1.25x900x1.83x1000 /4 = 514 687.5 N.mm

9.1.3. Vérification du montant

$$\frac{P_f}{P_r} + \frac{M_{fx}}{M_{rx}} + \frac{M_{fz}}{M_{rz}} \leq 1$$

$$\frac{281.25}{28100} + \frac{61875}{906000} + \frac{675000}{387000} = 1.82 \geq 1$$ *Pas acceptable*

Le montant avec la petite section de 2 pouces résistant au moment n'est pas adéquat. Ce calcul confirme les résultats des essais de la série 4 où les 3 montants ont subi des ruptures avec des charges de 800 N environ. Donc, il faut placer le 2x4 de façon à ce que la grande dimension de 4 pouces résiste au moment.

Lorsque le montant est placé avec la grande section de 4 pouces dans l'axe de la largeur de 4 pouces de la lisse

$$k = \frac{I_2}{I_1} \times \frac{M}{L} = 1 \times \frac{1.2}{1.83} = 0.66$$

Pour ce cas de charge, $a = b = \frac{L}{2}$

$$R_A = R_D = \frac{P}{2}$$

$$H_A = H_D = \frac{3PL}{8M(k+2)} = \frac{3 \times P \times 1.83}{8 \times 1.2 \times (0.66+2)} = 0.21P$$

$$\alpha = \frac{\frac{1}{2}L}{L} = 0.5$$

$$M_A = \frac{Pab}{2L}\frac{5k-1+2\alpha(k+2)}{(k+2)(6k+1)} = \frac{P \times 0.5 \times 1.83 \times 0.5 \times 1.83}{2 \times 1.83} \times \frac{5 \times 0.66 - 1 + 2 \times 0.5(0.66+2)}{(0.66+2)(6 \times 0.66+1)} = 0.11P$$

$M_A = M_D = 0.11P$

$M_B = M_A - H_A M$

$M_C = M_D - H_D M$

$$M_P = M_A - H_A M + R_A a = 0.11P - 0.21P \times 1.2 + \frac{P}{2} \times \frac{1.83}{2} = 0.32P$$

$$\frac{P_f}{P_r} + \frac{M_{fx}}{M_{rx}} + \frac{M_{fy}}{M_{ry}} \leq 1$$

$$\frac{281.25}{28100} + \frac{61875}{387000} + \frac{675000}{906000} = 0.91 \leq 1 \qquad \textit{Acceptable}$$

Il faut orienter le 2x4 du montant de façon à ce que la plus grande dimension de 4 pouces résiste à la flexion.

9.1.4. Vérification de la lisse supérieure

$M_{fx} = \alpha_D M_P = 1.25x0.24P$ N.m = 1.25x0.24x450x1000 = 135 000 N.mm

$M_{fz} = \alpha_D HL/4 = 1.25 \times 900 \times 1.83 \times 1000 / 4 = 514\,687.5$ N.mm

$$\frac{M_{fx}}{M_{rx}} + \frac{M_{fz}}{M_{rz}} \leq 1$$

$$\frac{135000}{387000} + \frac{514687.5}{906000} = 0.92 \leq 1 \qquad \textit{Acceptable}$$

La lisse est adéquate quel que soit l'orientation du montant de 2x4. Ce calcul confirme les résultats des essais statiques sur la lisse supérieure de la série 4. Les déformations de la section centrale de la lisse supérieure atteignaient 800 με, ce qui correspond à une contrainte peu élevée, correspondant environ à 20% de la contrainte ultime du bois.

9.2. Exigences de résistance pour le Règlement sur la santé et la sécurité du travail du Québec (RSST) – Cas de charge 1

D'après l'article 12 du RSST :

H = 0.55 kN = 550 N

P = 1.5 kN/m

Cas de charge 1 : La charge horizontale H = 0.55 kN agit sur le montant. Pour simplifier, nous ramenons l'étude à un montant encastré sollicité par les charges H et p.

9.2.1. Sollicitations sur le montant

Lorsque la petite section de 2 pouces résiste, les sollicitations dans le montant dues à H = 0.55 kN et p = 1.5 kN/m sont, d'après les formules du portique aux montants encastrés de l'annexe C :

Effort de compression dans le montant suivant z, $P_z = R_A = \frac{pL}{2} = \frac{1500 \times 1.83}{2} = 1372.5$ N

Moment fléchissant suivant x, $M_x = \frac{pL^2}{12(k+2)}$

$M_x = \frac{1500 \times 1.83^2}{12(0.12+2)} = 197.46$ N.m

Moment fléchissant suivant y, $M_y = MH = 1200x550 = 660\ 000$ N.mm.

Effort tranchant suivant x, $V_x = 550$ N

9.2.2. Sollicitations en travée

En travée, suivant l'axe de x, $M_{max} = \frac{pL^2}{24}\frac{3k+2}{k+2} = \frac{1500 \times 1.83^2}{24}\frac{3 \times 0.12+2}{0.12+2} = 233$ N.m

9.2.3. Vérification du montant d'après CAN/CSA-086.1-M89

Effort de compression pondéré dans le montant suivant z, $P_{fz} = 1.25P = 1.25x1372.5 = 1715.6$ N

Effort tranchant pondéré dans le montant suivant x, $V_{fx} = H_f = 1.25H = 1.25x550 = 687.50$ N

Moment fléchissant pondéré suivant x, $M_{fx} = 1.25 \times 197.46 = 246.83$ N.mm

Moment fléchissant pondéré suivant y, $M_{fy} = 1.25x660\ 000 = 825\ 000$ N.mm

$$\frac{P_{fz}}{P_r} + \frac{M_{fx}}{M_{rx}} + \frac{M_{fy}}{M_{ry}} \leq 1$$

Avec la petite dimension de 2 pouces qui résiste :

$$\frac{1715.63}{28100} + \frac{246.83}{906000} + \frac{825000}{387000} = 2.19 \geq 1$$ *Pas acceptable*

La grande dimension de 4 pouces résiste

$$\frac{1715.63}{28100} + \frac{246.83}{387000} + \frac{825000}{906000} = 0.97 \leq 1$$ *Acceptable*

Le montant doit être orienté pour que la section de 4 pouces résiste aux sollicitations.

9.3. Exigences de résistance pour le Règlement sur la santé et la sécurité du travail du Québec (RSST) – Cas de charge 2

H = 0.55 kN = 550 N
p = 1.5 kN/m
La charge ponctuelle horizontale H = 550 N agit à mi-portée de la lisse supérieure.

9.3.1. Vérification du montant d'après CAN/CSA-086.1-M89

Effort de compression pondéré dans le montant suivant z, $P_{fz} = 1.25P = 1.25x1372.5 = 1715.6$ N
Effort tranchant pondéré dans le montant suivant x, $V_{fx} = H_f/2 = 1.25H/2$
$= 1.25x550/2 = 343.75$ N
Moment fléchissant pondéré suivant x, $M_{fx} = 1.25 \times 197.46 = 246.83$ N.mm
Moment fléchissant pondéré suivant y, $M_{fy} = 1.25x660000/2 = 412500$ N.mm

$$\frac{P_{fz}}{Pr} + \frac{M_{fx}}{M_{rx}} + \frac{M_{fy}}{M_{ry}} \leq 1$$

$$\frac{1715.6}{28100} + \frac{246.83}{906000} + \frac{412500}{387000} = 1.13 \geq 1$$ *Pas acceptable*

Si le montant de 2x4 S-P-F est orienté pour que la grande dimension de 4 pouces résiste, nous avons :

$$\frac{P_{fz}}{Pr} + \frac{M_{fx}}{M_{rx}} + \frac{M_{fy}}{M_{ry}} \leq 1$$

$$\frac{1715.6}{28100} + \frac{246.83}{387000} + \frac{412500}{906000} = 0.52 \leq 1$$ *Acceptable*

9.3.2. Vérification de la lisse supérieure

Moment fléchissant pondéré en travée suivant x, $M_{fx} = 1250 \times 233 = 291250$ N.mm
Moment fléchissant pondéré en travée suivant z, $M_{fz} = 1.25HL/4$
$Mfz = 1250x550x1.83/4 = 314\,530$ N.mm

$$\frac{M_{fx}}{M_{rx}} + \frac{M_{fz}}{M_{rz}} \leq 1$$

$$\frac{291250}{387000} + \frac{314530}{906000} = 1.10 \geq 1$$ *Pas acceptable*

9.4. Exigences de résistance de OSHA

Article 1926.502(b)(3) :
Guardrails systems shall be capable of withstanding, without failure, a force of at least 200 pounds (890 N) applied within 2 inches (5.1 cm) of the top edge, in any outward or downward direction, at any point along the top edge.

Cas de charge 1

La charge de 890 N agit sur un montant : Les cas de chargements critiques possibles sont les suivants :
Cas 1a) P = 890 N et H = 0
Cas 1b) P = 0 et H = 890 N

Cas de charge 2

La charge de 890 N agit à mi-portée de la lisse supérieure. Les cas de chargements critiques possibles sont les suivants :
Cas 2a) P = 890 N et H = 0
Cas 2b) P = 0 et H = 890 N

9.4.1. Vérification du montant d'après CAN/CSA-086.1-M89 – Cas de charge 1a)

L'étude revient à étudier un montant encastré à sa base soumis à une compression P = 890 N
P_{fz} = 1.25 x 890 = 1112.5 N ≤ P_r = 28100 N *Acceptable*

9.4.2. Vérification du montant d'après CAN/CSA-086.1-M89 – Cas de charge 1b)

L'étude revient à étudier un montant encastré à sa base soumis à une charge H au sommet.
Moment fléchissant suivant y, M_{fy} = 1.25MH = 1.25x1200x890 = 1 335 000 N.mm
Moment fléchissant résistant maximal pour un 2x4 S-P-F No 1/No.2, M_r = 906 000 N.mm
Moment fléchissant résistant maximal pour un 2x4 S-P-F select structural, M_r = 1 270 000 N.mm
Nous avons $M_{fy} \geq M_r$ quelque soit le 2x4 utilisé *Pas acceptable.*

9.4.3. Vérification du montant d'après CAN/CSA-086.1-M89 - Cas de charge 2a)

L'étude revient à étudier un portique bi-encastré sollicité par une charge verticale P = 890 N.

k = 0.12

$$R_A = R_D = \frac{P}{2}$$

$$H_A = H_D = \frac{3PL}{8M(k+2)} = \frac{3\times P\times 1.83}{8\times 1.2\times(0.12+2)} = 0.27P$$

$$\alpha = \frac{\frac{1}{2}L}{L} = 0.5$$

$$M_A = 0.11P$$

$$M_D = M_D = 0.11\text{P}$$

$M_B = M_A - H_A M$

$M_C = M_D - H_D M$

$$M_P = M_A - H_A M + R_A a = 0.11\text{P} - 0.27\text{Px}1.2 + \frac{P}{2}\times\frac{1.83}{2} = 0.24\text{P}$$

Effort de compression pondéré $P_{fz} = \alpha_D R_A = \alpha_D P/2 = 1.25\text{x}890/2 = 556.25$ N

Effort tranchant pondéré $V_{fx} = 0$

Moment fléchissant pondéré suivant x, $M_{fx} = 1250 \text{ x } 0.11\text{P} = 1250\text{x}0.11\text{x}890\text{x}1000$
$= 122\,375$ N.mm

$$\frac{P_{fz}}{\text{Pr}} + \frac{M_{fx}}{M_{rx}} \le 1$$

$$\frac{556.25}{28100} + \frac{122375}{906000} = 0.15 \le 1 \qquad \textit{Acceptable}$$

9.4.4. Vérification de la lisse supérieure d'après CAN/CSA-086.1-M89 - Cas de charge 2a)

Moment fléchissant pondéré en travée suivant x, $M_{fx} = 1.25\text{x}0.11\text{P} = 1.25\text{x}0.11\text{x}890\text{x}1000$
$= 12.38$ N.m $= 122375$ N.mm

En travée : $M_{fx} \le M_r$ partout avec ce cas de charge *Acceptable*

9.4.5. Vérification du montant d'après CAN/CSA-086.1-M89 - Cas de charge 2b)

L'étude revient à étudier un portique bi-encastré sollicité par une charge horizontale H = 890 N. Comme vu au paragraphe 9.3, la charge H, perpendiculaire au portique, agit le long de l'axe x. Elle engendre les sollicitations suivantes dans le portique :

- aux appuis des montants, deux réactions égales H/2 et opposées à H le long de l'axe x;
- un moment fléchissant à la base du montant porté par l'axe y, $M_y = MH/2$;
- un moment fléchissant à mi-portée de la lisse supérieure porté par l'axe z, $M_z = HL/4$

À la base du montant nous avons :

Effort tranchant pondéré $V_{fx} = H_f/2 = \alpha_D H/2 = 1.25\text{x}890/2 = 556.25$ N

Moment fléchissant pondéré suivant y $M_{fy} = 1.25MH/2 = 1.25\text{x}1200\text{x}890/2$
$= 675\,000$ M.mm

À mi-portée de la lisse supérieure :

Moment fléchissant pondéré à mi-travée suivant z, M_{fz} $= \alpha_D HL/4$
$= 1.25 \times 890 \times 1830/4$
$= 508\,968.75$ N.mm

Pour le montant:

$$\frac{P_f}{P_r} + \frac{M_{fy}}{M_{ry}} \leq 1$$

$$0 + \frac{675000}{387000} = 1.74 \geq 1 \qquad \textit{Pas acceptable}$$

Le montant avec la petite section de 2 pouces résistant au moment n'est pas adéquat. Donc, il faut placer le 2x4 de façon à ce que la grande dimension de 4 pouces résiste au moment.

$$0 + \frac{675000}{906000} = 0.75 \leq 1 \qquad \textit{Acceptable}$$

Pour la lisse supérieure

$$\frac{P_f}{P_r} + \frac{M_{fz}}{M_{rz}} \leq 1$$

$$0 + \frac{508968.75}{906000} = 0.56 \leq 1 \qquad \textit{Acceptable}$$

9.4.6. Résultats et observations sur la comparaison des règlements et normes

Les résultats de la modélisation du garde-corps par un portique bi-encastré confirment les résultats des essais statiques de la série 4. Le montant seul ne peut pas résister aux charges stipulées par les règlements. Il faut nécessairement les renforcer avec des goussets de contre-plaqué ou une jambe de force en 2x4. L'utilisation des outils numériques s'avère nécessaire et offre plusieurs avantages à l'ingénieur et au chercheur. Parmi ceux-ci, mentionnons que les séquences de chargement et les différentes configurations géométriques de garde-corps peuvent être modifiées et analysés, réduisant ainsi le nombre d'essais in situ et en laboratoire qui sont fort coûteuses. L'utilisation de ces outils numériques est envisagée lors de la phase 2 de l'étude.

10. CONCLUSIONS

Pour rappel, les objectifs de l' étude sont les suivants :

1) Vérifier si la conception et l'installation des garde-corps fabriqués et installés à pied d'œuvre sur les chantiers de construction sont sécuritaires et rencontrent les exigences des articles 3.8.2 et 3.8.3 du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec pour assurer aux travailleurs une meilleure protection contre les chutes et définir les paramètres d'ancrage;
2) Comparer et analyser les exigences de résistance des règlements et normes internationaux et proposer si possible, un critère enveloppe synthèse des exigences de résistance qui reflètent mieux la réalité;
3) Définir le couple de serrage minimal pour assurer la sûreté d'un étai métallique comme support de garde-corps;
4) Définir un critère de flèche pour les garde-corps.

Cette étude s'appuie sur une démarche intégrant l'observation des garde-corps in-situ, une méthode et un protocole d'essais en laboratoire et une application des méthodes classiques de la résistances des matériaux.

Voici les principales conclusions de l'étude.

10.1. Conformité au Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec S-2.1, r.6

10.1.1. Garde-corps en bois de type

Essais statiques

L'article 3.8.2 du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec, S-2.1,r.6 exige *que le garde-corps résiste à des charges de 900 N horizontale et 450 N verticale appliquées simultanément en n'importe quel point de la lisse supérieure du garde-corps.*

Les résultats des essais statiques de la série 4 montrent que les garde-corps en bois réalisés couramment sur les chantiers ne rencontrent pas toujours ces exigences. Lorsque les charges sont appliquées directement sur les montants, la charge horizontale doit être résistée par le montant seul. Lors de nos essais, les résistances à la rupture ont varié entre 700 N et 900 N, alors que l'exigence est de 900 N. Pour ces montants, deux façons de faire permettraient d'atteindre la résistance requise :

a) Choisir du bois de plus grande qualité, par exemple des 38x89 Select Structural S-P-F. Ceci n'est pas facilement réalisable dans les conditions courantes du marché;
b) Orienter le montant de 2x4 de façon à utiliser la plus grande résistance du montant, en faisant résister la charge horizontale par la grande dimension (4 po.). Le module de section est alors le double du module de section lorsque la plus petite section de 2 po. résiste à la charge horizontale.

L'utilisation d'un assemblage mixte montant-gousset pose certains problèmes:

a) L'assemblage gousset-montant avec une rangée de clous est déformable. Le montant se déplace par rapport aux goussets. Si le montant était orienté selon son axe fort, nous pourrions utiliser 2 rangées de clous, ce qui augmenterait grandement la résistance de cette attache.
b) La fixation de la patte à la dalle avec deux clous n'est pas suffisamment rigide. Il faut au moins 3 clous.
c) Lorsque la charge a été appliquée directement sur le montant, la patte s'est soulevée de 25 mm.
d) Lorsque la charge a été placée au centre des travées, les montants ne supportent que la moitié de la charge et le soulèvement a été alors réduit à une valeur de 3 à 5 mm.

Essais dynamiques

Les essais dynamiques avec le torse de bois de 100 kg sont des essais très sévères et ne reflètent pas la réalité de l'impact du travailleur sur la lisse supérieure. Lors de l'essai dynamique sur un montant de garde-corps en bois, l'impact est absorbé par un seul montant qui se brise sous le choc, ce qui entraîne la chute du mannequin. Lors de l'essai dynamique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois, le mannequin a basculé suite au soulèvement des pattes et au bris des lisses supérieure et intermédiaire.

Lors de l'essai dynamique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps en bois, le mannequin a été retenu grâce à la continuité des lisses de 12 pieds. Nous notons toutefois la rupture de la lisse supérieure et le soulèvement de 8 mm des ancrages. Lors de l'essai dynamique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps, aucun bris ne fut constaté. Nous attribuons ce résultat au fait que le bois de la lisse était encore vert et qu'il a absorbé le choc au lieu de se rompre.

Les résultats des essais dynamiques montrent que :

- Le montant devrait être orienté pour que sa résistance maximale soit utilisée: mettre la dimension de 4 po. dans le sens de la charge et celle de 2 po. perpendiculaire à la charge.
- La marge de sécurité contre le basculement n'est pas suffisante lorsqu'il n'y a qu'une travée. Les ancrages sont plus sollicités que lorsqu'il y a plusieurs travées et les ancrages subissent un début d'arrachement. Il faudra augmenter la capacité des ancrages.
- Dans l'essai sur la travée de rive, nous avons aussi noté le soulèvement des ancrages. Ceci confirme que le design et la réalisation au chantier des ancrages actuels sont inadéquats et déficients.
- Le bois utilisé dans les essais 5-1, 5-2 et 5-3 était sec contrairement à celui de l'essai 5-4, ce qui a été favorable dans ce dernier cas.

10.1.2. Garde-corps avec étais métalliques comme supports

Essai de serrage

Les essais de serrage (6-la, 6-lb et 6-lc) ont permis d'établir la force que nous pouvons induire dans un étai serré jusqu'à blocage entre 2 planchers en béton. En utilisant un étai instrumenté et calibré, nous avons mesuré qu'un technicien muni d'une clé de 300 mm arrivait à introduire des forces de 18 à 20 kN, que la vis de l'étai soit sèche ou huilée. La force de friction d'un étai bloqué au maximum a été mesurée entre 6.9 et 8.8 kN, ce qui a permis d'établir un coefficient de friction contreplaqué-béton de $\mu = 0.44$ à 0.49.

Essais statiques

Les déplacements en fonction de la charge appliquée dans le sens de la charge horizontale (direction *x*), dans le sens vertical (direction *y*) et selon le sens longitudinal du garde-corps (direction z) sont petits. Les déplacements les plus importants, de l'ordre de quelques millimètres, se sont produits dans la direction *x* et sont principalement dus à la reprise du jeu entre les tubes mâle et femelle de l'étai et à la flexion de la lisse supérieure.

Un garde-corps doit supporter une poussée horizontale de 900 N et une charge verticale de 450 N. La sollicitation maximale est obtenue lorsque ces charges sont placées au centre du garde-corps. Ce dernier a un montant en son centre et il résiste aisément à la charge verticale. La charge horizontale de 900 N est résistée par les 2 étais. Ces derniers peuvent résister, à cause du serrage appliqué, à au moins 6.9 kN chacun avant de glisser. Cette résistance est plus de 10 fois la charge appliquée.

Essais dynamiques

De même, lors des essais dynamiques avec le torse de bois, l'étai étant bien coincé entre les dalles supérieure et inférieure, il peut résister à une force horizontale de l'ordre de 15 à 19 kN (voir essais 6-2), ce qui est nettement supérieure à la force d'impact générée par le mannequin ayant une masse de 100 kg.

Lors des essais 7-2, 7-3 et 7-4, la lisse supérieure étant plus haute que le centre de gravité, il n'y a pas eu de basculement du mannequin. Ce dernier a été bien retenu par le garde-corps en bois qui avait la résistance voulue et qui a bien résisté. Les étais étaient suffisamment coincés entre les dalles supérieure et inférieure, il n'y a donc pas eu déplacement des étais.

Remarques sur les étais métalliques comme supports

Comme le souligne le CSAO (Construction Safety Association of Ontario), l'étai métallique est un support résistant qui a fait ses preuves dans l'industrie de la construction sur le continent nord-américain. Les cadres en bois ou métalliques qui font office de garde-corps doivent avoir la résistance exigée par les textes réglementaires. Les étais métalliques comme supports conviennent lorsqu'il y a deux dalles pour les coincer. Il faut vérifier périodiquement le serrage des étais métalliques puisque la vibration, le retrait, le fluage et la déformation du béton peuvent

desserrer les étais. Conséquemment, les garde-corps avec des étais métalliques comme supports sont sécuritaires et conformes au Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec. La force de serrage du travailleur est adéquate pour donner une force de compression élevée pour engendrer une force surabondante de frottement environ dix fois supérieures aux exigences de résistance du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec.

10.2. Comparaison des exigences de résistance

La comparaison des sollicitations qu'engendrent les exigences de résistance de S-2.1, r.6, RSST et OSHA dans les membrures d'un portique bi-encastré confirment les résultats d'essais statiques en laboratoire. Avec les résultats préliminaires obtenus, il est difficile de proposer un critère enveloppe synthèse des exigences de résistance qui reflètent mieux la réalité. Il doit y avoir un effort d'harmonisation des exigences de résistance, surtout pour les règlements d'un même pays, par exemple le S-2.1, r.6 et le RSST. L'utilisation des moyens numériques apportera peut-être des informations supplémentaires à ce questionnement.

10.3. Critère de flèche

Pour les essais de basculement de la série 8, nous avons renforcé la lisse supérieure en ajoutant un deuxième 2x4 puisque lors des essais 5.2 et 5.3, la lisse supérieure, formée d'un seul 2x4, s'était rompue. Cet ajout s'est avéré suffisant, car aucune lisse n'a cédé. Par contre, nous notons toujours des soulèvements de 8 à 18 mm des pattes du garde-corps, ce qui confirme que ce genre d'ancrage n'est pas assez résistant. Le mannequin a été retenu lorsque la lisse supérieure était à 1 ou 1.1 mètre du sol. Par contre, lorsqu'elle se trouvait à 0.9 mètre, le mannequin a basculé.

Pour les essais de basculement avec une lisse supérieure flexible faite d'un câble en polypropylène, le mannequin a été retenu lorsque le câble était à 1.1 mètre du sol. Toutefois, lorsqu'il était placé à 1.0 mètre ou 0.9 mètre, le mannequin a basculé par-dessus le câble dont les nœuds ont glissé, surtout lors de l'essai 8-2c.

Pour les essais de basculement avec une lisse supérieure faite d'un câble d'acier de ½ po. de diamètre, le mannequin est retenu lorsque le câble est à une hauteur de 1.0 et 1.1 mètres. Lorsqu'il est placé à 0.9 mètre, plus bas que le centre de gravité du mannequin, celui-ci bascule par-dessus le câble.

Ces résultats montrent que le mannequin bascule par-dessus la lisse supérieure quel que soit la nature de la lisse supérieure lorsque celle-ci est à 0.90 m de haut par rapport à la surface de travail. Les résultats des essais de Jacmin et Mayer (Jacmin et Mayer, 1984) montrent que le seuil de basculement du mannequin, lorsque la ralingue est détendue, correspond à une flèche de 0,35/0,40 m, soit une hauteur de 0,80 à 0,85 m par rapport au pied du mobile.

Nous pouvons conclure que la hauteur seuil de la lisse supérieure pour éviter que le mannequin bascule par dessus la lisse supérieure est 0.95 m. Comme critère de flèche (ou de déformation), nous pouvons nous inspirer de l'article 1926.502(b)(4) d'OSHA qui stipule « *When the 200 pound (890 N) test load specified in paragraph (b)(3) of this section is applied in a downward direction, the top edge of the guardrail shall not deflect to a height less than*

39 inches (1.0 m) above the walking/working level ». Nous proposons le critère de flèche suivant : « Lorsque les charges de 450 N verticale et 900 N horizontale s'appliquent sur la lisse supérieure, celle-ci ne doit pas se déformer à une hauteur inférieure à 0.95 m au-dessus de la surface de travail ».

10.4. Application de la méthode aux chantiers

Aux chantiers, le protocole d'essais peut être appliqué relativement facilement. Les exigences de construction sont vérifiées en mesurant et en comparant les différentes membrures du garde-corps avec les exigences de l'article 3.8.3 de S-2.1, r.6. Si les garde-corps s'apparentent à ceux testés en laboratoire, nous pouvons appliquer les résultats de l'étude directement. Les garde-corps avec des étais métalliques comme supports sont sécuritaires et conformes au S-2.1, r.6. Pour les garde-corps en bois avec des ancrages différents de ceux testés, les essais de résistance statiques peuvent être effectués in situ en toute sécurité. La charge verticale de 450 N est appliquée au centre de la lisse supérieure et la charge horizontale de 900 N peut être appliquée par pas de 100 N à l'aide d'un tendeur sur des sections de garde-corps érigées loin du vide, sur une partie du plancher.

11. RECOMMANDATIONS

À la lumière des résultats des essais en laboratoire et de la comparaison de trois règlements (S-2.1, r.6, RSST et OSHA), voici les principales recommandations de l'étude.

1. L'article 3.8.2 du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec, S-2.1,2.6 exige *que le garde-corps résiste à des charges de 900 N horizontale et 450 N verticale appliquées simultanément en n'importe quel point de la lisse supérieure du garde-corps.*

L'article 3.8.3 du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec, S-2.1,r.6 est très explicite et exige *que la lisse supérieure d'une épaisseur minimale de 40 mm sur une largeur de 90 mm appuyée sur des montants de même dimension espacés d'au plus 1.8 m placés de telle façon que la largeur de 90 mm du montant soit dans l'axe de la largeur de la lisse supérieure.*

Pourtant, sur les chantiers observés, les montants sont placés avec la largeur de 90 mm du montant *perpendiculaire* à l'axe de la largeur de la lisse supérieure. Un tel montage est non conforme à l'article 3.8.3. Nous recommandons donc d'orienter le montant de 2x4 de façon à ce la plus grande dimension de 4 pouces résiste à la flexion. Ainsi placé, le module de section du 2x4 est alors le double du module de section du 2x4 avec la face de 4 pouces placée perpendiculairement à la charge horizontale, position utilisée lors de l'essai.

2. S-2.1, r.6 ne spécifie pas la qualité du bois à utiliser pour les garde-corps. Les résultats d'essais et les calculs montrent que le bois S-P-F No.1/No. 2 seuls ne sont pas adéquats comme montants de garde-corps en bois. Par conséquent, il faut choisir du bois de plus grande qualité. Ceci n'est pas facilement réalisable dans les conditions courantes du marché. Il faut aussi renforcer les montants avec des goussets en contre-plaqué ou par une jambe de force en 2x4 puisque le montant seul ne résiste pas aux charges stipulées par les règlements.

3. L'utilisation d'un assemblage mixte montant-gousset pose certains problèmes. L'assemblage gousset-montant avec une rangée de clous est déformable. Le montant se déplace par rapport aux goussets. Si le montant était orienté selon son axe fort, nous pourrions utiliser 2 rangées de clous, ce qui augmenterait grandement la résistance de cette attache. La fixation de la patte à la dalle avec deux clous n'étant pas suffisamment rigide, il faut au moins trois clous pour rigidifier l'ancrage.

4. Les garde-corps avec des étais métalliques comme supports sont très fiables et peuvent être utilisés en toute sécurité sur les chantiers comme le recommande le CSAO.

5. La qualité du bois et le critère de flèche feront l'objet de recommandations auprès du comité de révision du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec pour qu'ils soient inclus dans les articles relatifs aux garde-corps dans le code de sécurité pour les travaux de construction du Québec.

6. Les essais dynamiques et les essais de basculement avec le torse de bois de 100 kg sont des essais très sévères et ne reflètent pas la réalité d'un choc entre un travailleur et la lisse supérieure du garde-corps. Ils constituent la borne supérieure des résultats. La comparaison des

règlements et normes ne permettent pas non plus de proposer une enveloppe synthèse des exigences de résistance. Seuls les essais dynamiques qui tiennent compte de la déformabilité de la lisse supérieure et du corps humain reflètent mieux la réalité de la dynamique d'arrêt de chute par un garde-corps. À cette fin, nous recommandons d'initier la phase 2 de l'étude.

Cette phase traitera des sujets suivants :

1) Définir le heurt réaliste le plus sévère d'une personne sur un garde-corps en prenant en compte la déformabilité du corps humain. Les conditions du choc doivent être déterminées (choc mou ou choc élastique);
2) Traduire ce heurt en termes mécaniques (recours à la biomécanique);
3) Traduire ce heurt en termes de sollicitations du garde-corps (les caractéristiques mécaniques du garde-corps et du corps doivent intervenir).

12. RÉFÉRENCES

AFNOR NF P 93-340 - « Garde-corps métallique provisoire de chantier (GCMPC) ».

ANSI A 12.1-1973. Safety Requirements for Floor and Wall Openings, Railings, and Toeboards. American National Standards Institute, New York, New York.

ANSI A 10.18-1983. Safety Requirements for Temporary Floor and Wall Openings, Flat Roofs, Stairs, Railings, and Toeboards for Construction. American National Standards Institute, New York, New York.

Arteau, J. et Giguère, D. (1991). Proposed method to test harness for strength and human factors criteria in « Fundamentals of fall protection ». Edited by A.C. Sulowski. International Society for Fall Protection, Toronto.

Arteau, J. et Giguère, D. (1993). Efficacité, fiabilité et confort comme critères d'évaluation des équipements de protection individuelle. Colloque international du Comité de Recherche de l'AISS (4; 1992 Strasbourg). Maîtriser le risque au poste de travail, Presses universitaires de Nancy, p. 345- 347.

ASTM E 985-87. Standard Specification for Permanent Metal Railing Systems and Rails for Buildings, American Society For Testing and Materials, Philadelphia, Pa.

British Standard Code of Practice (BSI). BSI 6180 : 1982 - Protective barriers in and about buildings.

CAN/CSA-086.1-M89. (1989). *Engineering Design in Wood - Limit States Design.* Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario.

CAN/CSA-Z259.10-M90. (1990). *Full Body Harnessess* Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario.

CSA-A23.3-M94. (1994). *Design of concrete structures.* Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario.

Cattledge, G., Hendricks, S. et Stanevich, R. (1996). Fatal Occupational falls in the U.S. construction industry, 1980-1989. *Accident Analysis and Prevention, 28(5)*, 647-654.

Code National du bâtiment du Canada, CNBC (1985). Conseil National de Recherches du Canada, Ottawa, Ontario.

CSAO. (1996). Guardrails. Construction Safety Association of Ontario, Toronto, Ontario.

CSA-A23.3-M94 – Design of concrete structures. (1994). Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario.

Goulet, J. (1976). Aide-mémoire Résistance des matériaux. Collection Aide Mémoire Dunod, 6ième édition, Paris.

Jacmin, M. et Mayer, A. (1984). Écran garde-corps - Protection contre les chutes de grande hauteur pour les travaux d'étanchéité en toiture. Édition I.N.R.S. ED 1180 – Tiré à part de l'article publié dans la revue mensuelle *« Travail et Sécurité » de mai 1984.*

Kahn, G. et Lantier, F. (1985). Travail et sécurité sur les chantiers du bâtiment. Colloque *"À partir du chantier ...", Ed Plan construction et habitat, paris.*

Kisner, S. et Fosbroke, D. (1994). Industry hazards in the construction industry. *Journal of Occupational Medicine, 36(2),* 137-143.

Occupational Health and Safety Act and Regulations for Construction Projects (1996). Ministry of Labour, Ontario.

OPPBTP. (1984). *Les équipements individuels de protection contre les chutes. 16 p.* Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics. Boulogne-Billancourt, France.

OPPBTP. (1994). *Mémo-pratique B1 M01 94.* Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics, Boulogne-Billancourt, France.

OSHA. (1998). *Part 1926 Subpart M CFR 1926.500 - Fall Protection for the Construction Industry.* U.S. Department of Labor, Washington, DC.

OSHA. (1990). *Analysis of Construction Fatalities - The OSHA Data Base 1985-1989.* U.S. Department of Labor, Washington, DC.

OSHA (Occupational Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor) - 1926.502 Fall protection systems criteria and practices, subpart M. U.S. Department of Labor, Washington, DC.

RSST. (2001). *Règlement sur la santé et la sécurité du travail.* Éditeur officiel du Québec. Québec.

RQMT - Règlement sur la qualité du milieu du travail. Projet de règlement sur la qualité du milieu de travail, le 16 septembre 1998. Les Publications du Québec, Gouvernement du Québec.

SESS. (1999). *Service d'expertise et soutien statistique, IRSST – Sources : Base de données de l'INFOCENTRE de la CSST mise à jour au 1 mai 1999.*

S-2.1, r.6. (2001). Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec. Les Publications du Québec, Gouvernement du Québec. Québec.

S-2.1, r.9. (1997). Règlement sur les établissements industriels et commerciaux, S-2.1, r.9 (dernière modification 24 avril 1997). Les Publications du Québec, Gouvernement du Québec.

ST03-19. (2003) . Rapport ST03-19. Essais statiques et dynamiques sur différents types de garde-corps. Département de génie civil, École Polytechnique de Montréal, Montréal.

Surada, A., Fosbroke, D., et Braddee, R. (1995). Fatal work-related falls from roofs. *Journal of Safety Research, 26, (1), 1-8.*

Toulouse, G. (1986). Ergonomie et sécurité: un exemple dans le secteur du bâtiment, *Colloque sur la place de l'ergonomie dans l'entreprise, 54 ième congrès de l'ACFAS.*

US Bureau of Labor Statistics. (1996). *Fatal Workplace Injuries in 1994: A collection of Data and Analysis*. (BLS Publication No. 908). Washington, DC: US Government Printing Office.

ANNEXE A (A-1, A-2, A-3, A-4 et A-5)

GRAPHIQUES DES RÉSULTATS DES ESSAIS

LISTE DES FIGURES DE L'ANNEXE A

Figure A.1 Essai 4-1a : Déplacement du montant selon la charge appliquée 105
Figure A.2 Essai 4-1a : Déformations unitaires selon la charge appliquée..... 105
Figure A.3 Essai 4-1b : Déplacement du montant selon la charge appliquée..... 106
Figure A.4 Essai 4-1b : Déformations unitaires selon la charge appliquée 106
Figure A.5 Essai 4-1c : Déplacement du montant selon la charge appliquée 107
Figure A.6 Essai 4-1c : Déformations unitaires selon la charge appliquée..... 107
Figure A.7 Essai 4-1supp : Déplacement du montant selon la charge appliquée 108
Figure A.8 Essai 4-1supp : Déformations unitaires selon la charge appliquée..... 108
Figure A.9 Essai 4-2 : Déplacement de la lisse selon la charge appliquée 109
Figure A.10 Essai 4-2 : Déformations unitaires dans le poteau selon la charge appliquée 109
Figure A.11 Essai 4-2 : Déformations unitaires dans la lisse selon la charge appliquée..... 110
Figure A.12 Essai 4-3 : Déplacement de la lisse selon la charge appliquée 111
Figure A.13 Essai 4-3 : Déformations unitaires dans le poteau selon la charge appliquée 111
Figure A.14 Essai 4-3 : Déformations unitaires dans la lisse selon la charge appliquée..... 111
Figure A.15 Essai 4-4 : Déplacement de la lisse selon la charge appliquée 112
Figure A.16 Essai 4-4 : Déformations unitaires dans le poteau selon la charge appliquée 112
Figure A.17 Essai 4-4 : Déformations unitaires dans la lisse selon la charge appliquée..... 112
Figure A.18 Essai 5-1 : Déplacement d'un montant selon l'axe des x 113
Figure A.19 Essai 5-1 : Déplacement du montant selon l'axe des z..... 113
Figure A.20 Essai 5-2 : Déplacement de la lisse selon l'axe des x..... 114
Figure A.21 Essai 5-2 : Déplacement de la lisse selon l'axe des y..... 114
Figure A.22 Essai 5-2 : Déplacement de la lisse selon l'axe z..... 114
Figure A.23 Essai 5-3 : Déplacement de la lisse selon l'axe des x..... 115
Figure A.24 Essai 5-3 : Déplacement de la lisse selon l'axe des y..... 115
Figure A.25 Essai 5-3 : Déplacement de la lisse selon l'axe z..... 115
Figure A.26 Essai 5-4 : Déplacement de la lisse selon l'axe des x..... 116
Figure A.27 Essai 5-4 : Déplacement de la lisse selon l'axe des y..... 116
Figure A.28 Essai 5-4 : Déplacement de la lisse selon l'axe z..... 116
Figure A.29 Essai 6-3 : Déplacement du montant selon la charge appliquée..... 117
Figure A.30 Essai 6-4 : Déplacement de la lisse supérieure selon la charge appliquée..... 117
Figure A.31 Essai 6-5 : Déplacement de la lisse selon l'axe des x..... 118
Figure A.32 Essai 6-5 : Déplacement de la lisse selon l'axe des y..... 118
Figure A.33 Essai 6-5 : Déplacement de la lisse selon l'axe z..... 118
Figure A.34 Essai 6-6 : Déplacement de la lisse selon l'axe des x..... 119
Figure A.35 Essai 6-6 : Déplacement de la lisse selon l'axe des y..... 119
Figure A.36 Essai 6-6 : Déplacement de la lisse selon l'axe z..... 119
Figure A.37 Essai 7-1 : Déplacement de l'étai métallique selon l'axe des x..... 120
Figure A.38 Essai 7-1 : Déplacement de l'étai métallique selon l'axe des z..... 120
Figure A.39 Essai 7-2 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x..... 121
Figure A.40 Essai 7-2 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y..... 121
Figure A.41 Essai 7-2 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe z..... 121
Figure A.42 Essai 7-3 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x..... 122
Figure A.43 Essai 7-3 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y..... 122

Figure A.44 Essai 7-3 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe z 122
Figure A.45 Essai 7-4 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x 123
Figure A.46 Essai 7-4 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y 123
Figure A.47 Essai 7-4 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe z 123
Figure A.48 Essai 8-1a : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x 124
Figure A.49 Essai 8-1a : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z 124
Figure A.50 Essai 8-1b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x 125
Figure A.51 Essai 8-1b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y 125
Figure A.52 Essai 8-1b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z 125
Figure A.53 Essai 8-1c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x 125
Figure A.54 Essai 8-1c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y 125
Figure A.55 Essai 8-1c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z 125
Figure A.56 Essai 8-2a (reprise) : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x 126
Figure A.57 Essai 8-2a (reprise) : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y 126
Figure A.58 Essai 8-2a (reprise) : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z 126
Figure A.59 Essai 8-2b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x 126
Figure A.60 Essai 8-2b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y 126
Figure A.61 Essai 8-2b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z 126
Figure A.62 Essai 8-2c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x 127
Figure A.63 Essai 8-2c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y 127
Figure A.64 Essai 8-2c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z 127
Figure A.65 Essai 8-3a : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x 127
Figure A.66 Essai 8-3a : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y 127
Figure A.67 Essai 8-3a : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z 127
Figure A.68 Essai 8-3b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x 128
Figure A.69 Essai 8-3b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y 128
Figure A.70 Essai 8-3b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z 128
Figure A.71 Essai 8-3c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x 128
Figure A.72 Essai 8-3c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y 128
Figure A.73 Essai 8-3c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z 128

A-1 RÉSULTATS DE LA SÉRIE 4

A-1.1 Essai statique 4-1a sur un montant en bois

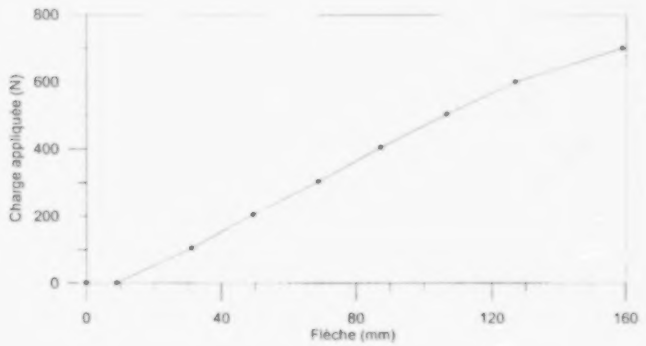


Figure A.1 Essai 4-1a : Déplacement du montant selon la charge appliquée

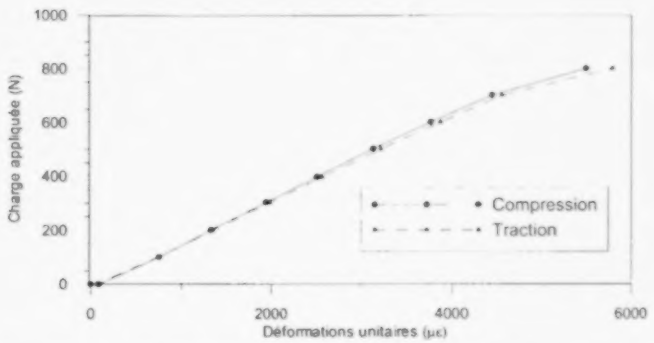


Figure A.2 Essai 4-1a : Déformations unitaires selon la charge appliquée

A-1.2 Essai statique 4-1b sur un montant en bois

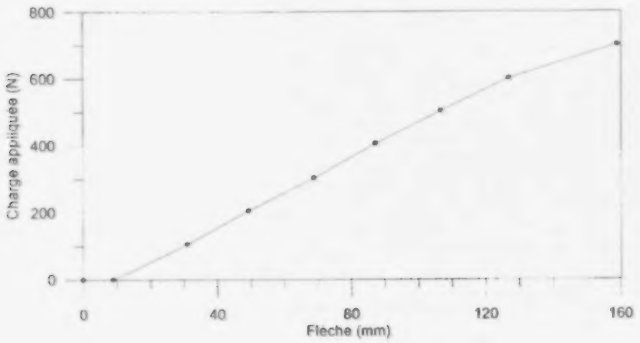


Figure A.3 Essai 4-1b : Déplacement du montant selon la charge appliquée

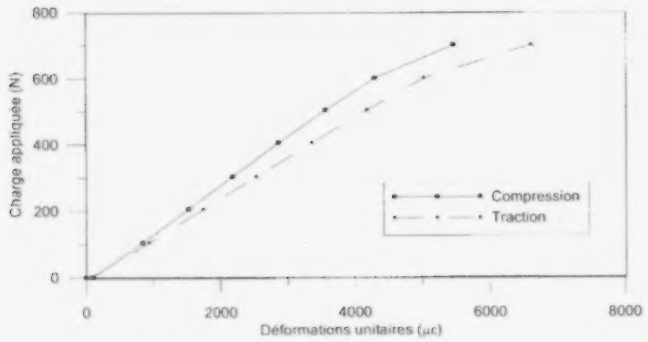


Figure A.4 Essai 4-1b : Déformations unitaires selon la charge appliquée

A-1.3 Essai statique 4-1c sur un montant en bois

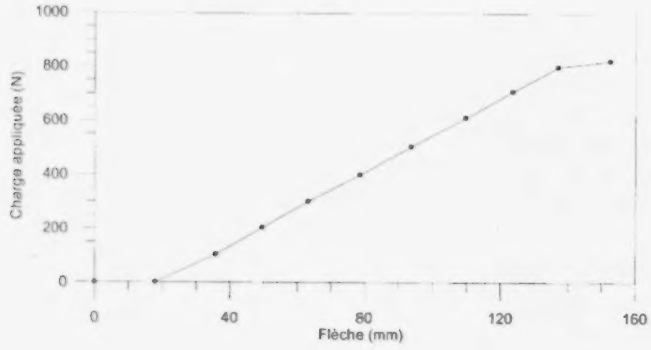


Figure A.5 Essai 4-1c : Déplacement du montant selon la charge appliquée

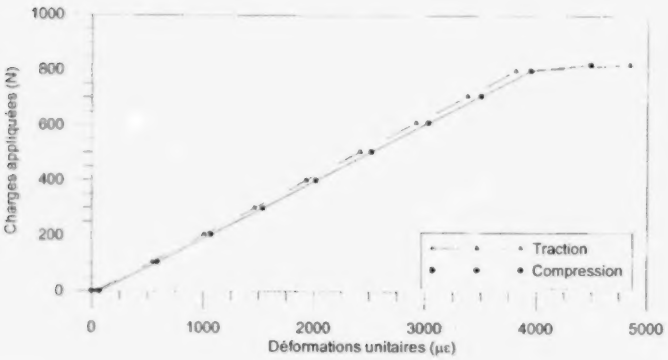


Figure A.6 Essai 4-1c : Déformations unitaires selon la charge appliquée

A-1.4 Essai statique 4-1-supplémentaire sur un montant en bois

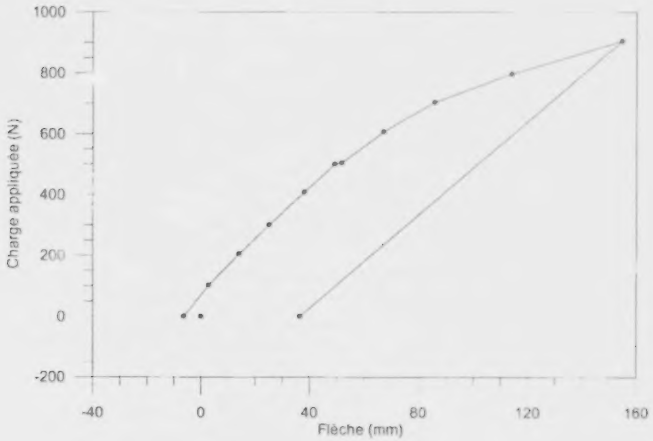


Figure A.7 Essai 4-1supp : Déplacement du montant selon la charge appliquée

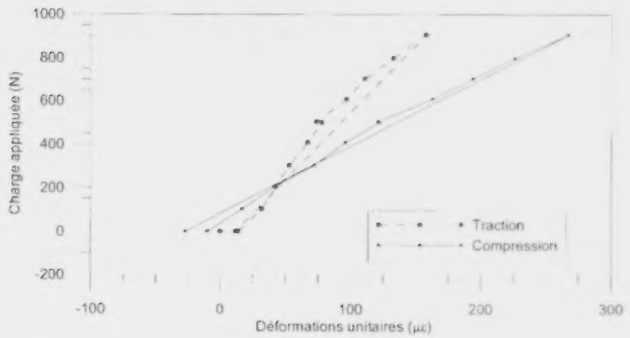


Figure A.8 Essai 4-1supp : Déformations unitaires selon la charge appliquée

A-1.5 Essai statique 4-2 sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps

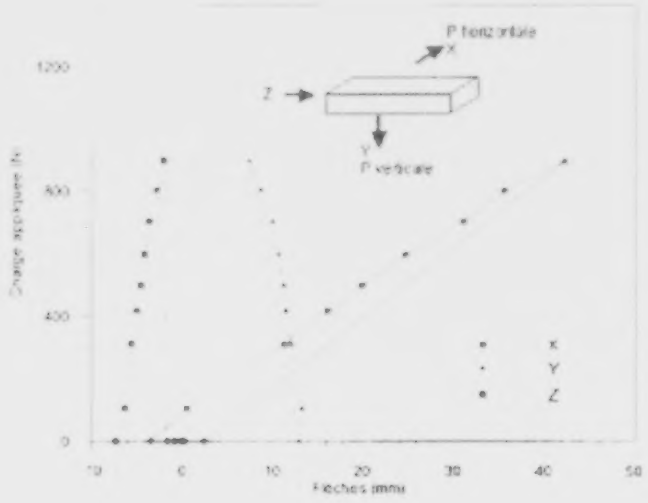


Figure A.9 Essai 4-2 : Déplacement de la lisse selon la charge appliquée

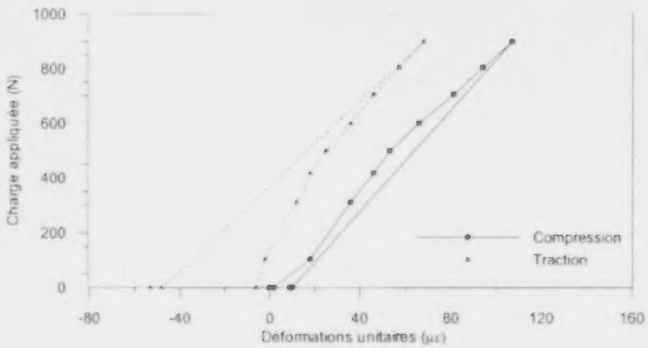


Figure A.10 Essai 4-2 : Déformations unitaires dans le poteau selon la charge appliquée

A-1.5 Essai statique 4-2 sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps

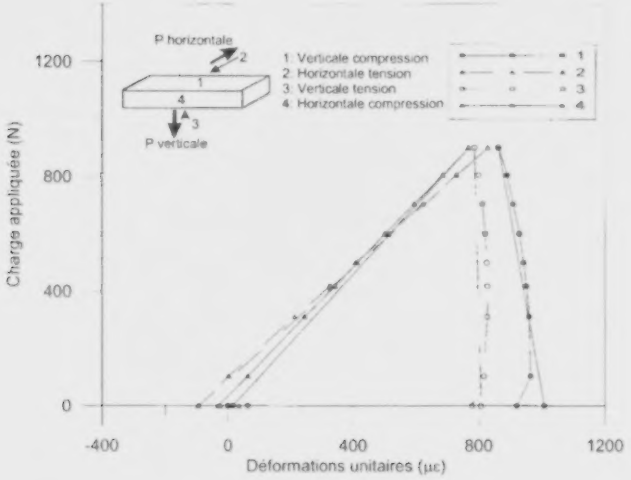


Figure A.11 Essai 4-2 : Déformations unitaires dans la lisse selon la charge appliquée

A-1.6 Essai statique 4-3 sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps

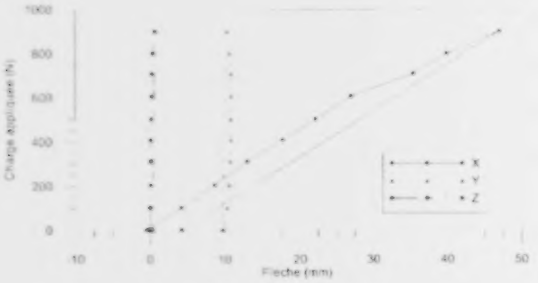


Figure A.12 Essai 4-3 : Déplacement de la lisse selon la charge appliquée

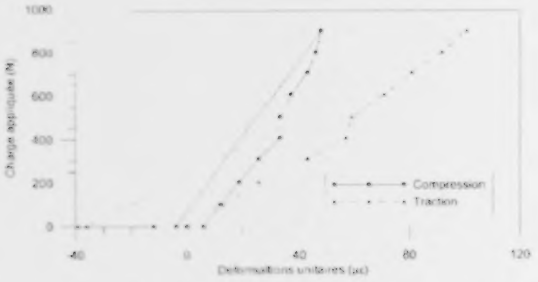


Figure A.13 Essai 4-3 : Déformations unitaires dans le poteau selon la charge appliquée

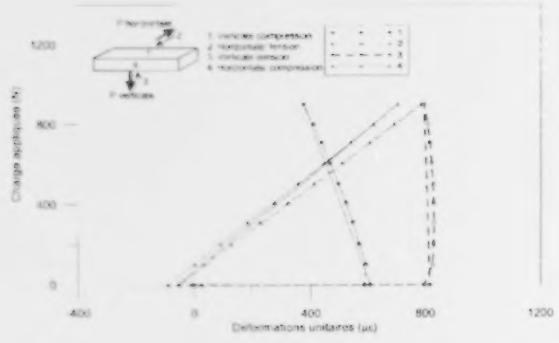


Figure A.14 Essai 4-3 : Déformations unitaires dans la lisse selon la charge appliquée

A-1.7 Essai statique 4-4 sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps

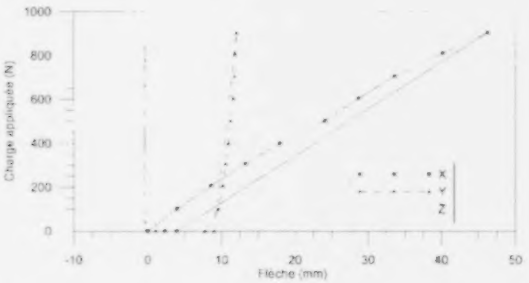


Figure A.15 Essai 4-4 : Déplacement de la lisse selon la charge appliquée

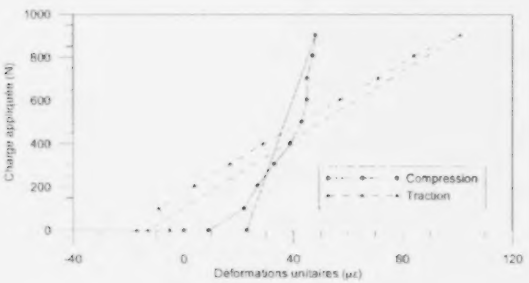


Figure A.16 Essai 4-4 : Déformations unitaires dans le poteau selon la charge appliquée

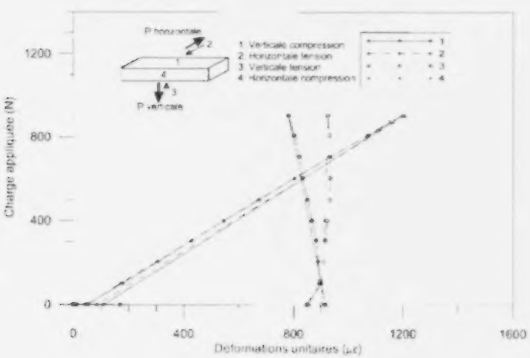


Figure A.17 Essai 4-4 : Déformations unitaires dans la lisse selon la charge appliquée

A-2 RÉSULTATS DE LA SÉRIE 5

A-2.1 Essai dynamique 5-1 sur un montant de garde-corps en bois

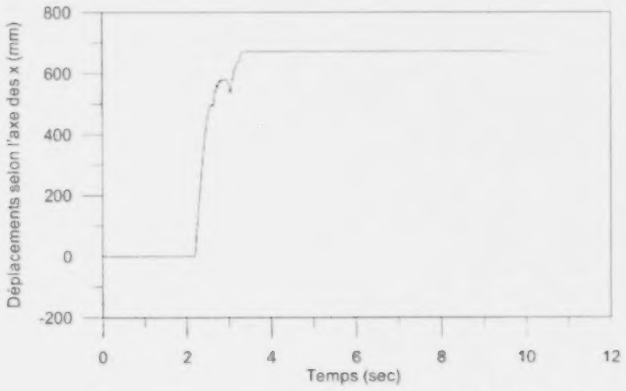


Figure A.18 Essai 5-1 : Déplacement d'un montant selon l'axe des x

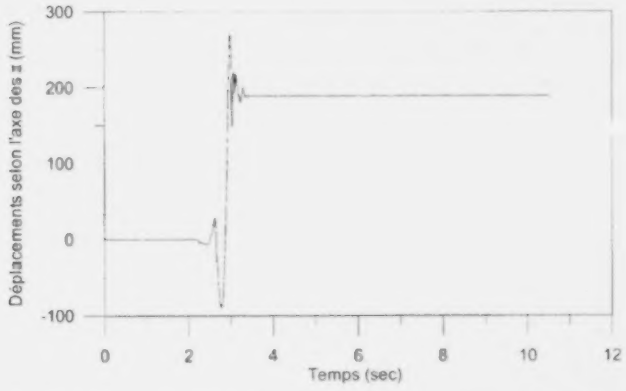


Figure A.19 Essai 5-1 : Déplacement du montant selon l'axe des z

A-2.2 Essai dynamique 5-2 sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois

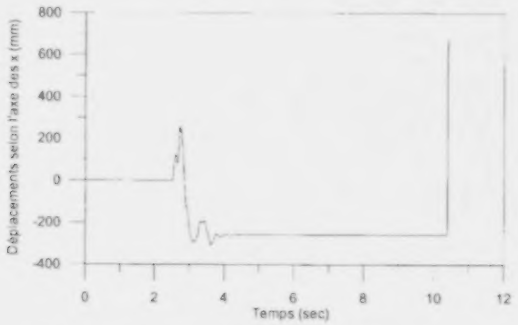


Figure A.20 Essai 5-2 : Déplacement de la lisse selon l'axe des x

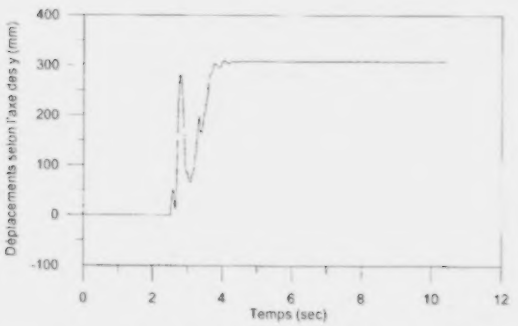


Figure A.21 Essai 5-2 : Déplacement de la lisse selon l'axe des y

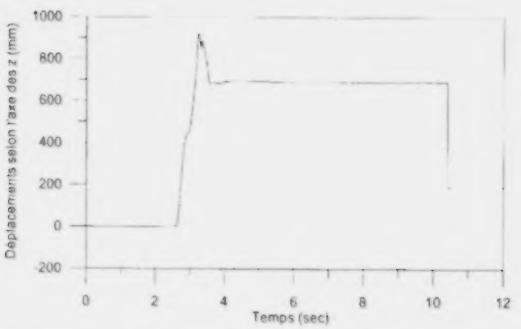


Figure A.22 Essai 5-2 : Déplacement de la lisse selon l'axe z

A-2.3 Essai dynamique 5-3 sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps en bois

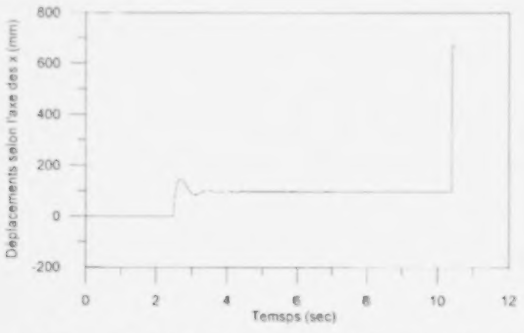


Figure A.23 Essai 5-3 : Déplacement de la lisse selon l'axe des x

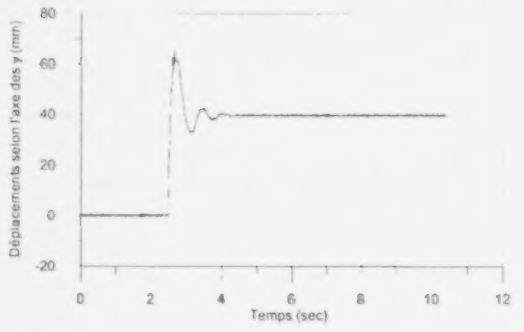


Figure A.24 Essai 5-3 : Déplacement de la lisse selon l'axe des y

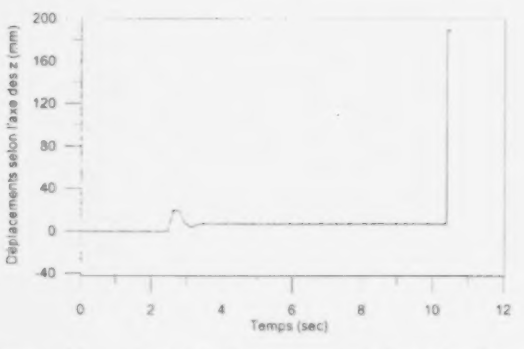


Figure A.25 Essai 5-3 : Déplacement de la lisse selon l'axe z

A-2.4 Essai dynamique 5-4 sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps en bois

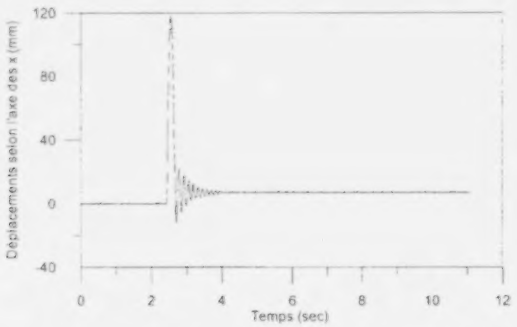


Figure A.26 Essai 5-4 : Déplacement de la lisse selon l'axe des x

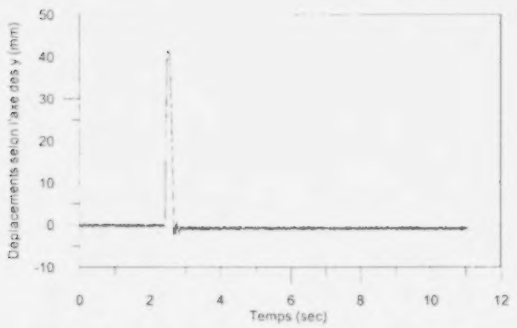


Figure A.27 Essai 5-4 : Déplacement de la lisse selon l'axe des y

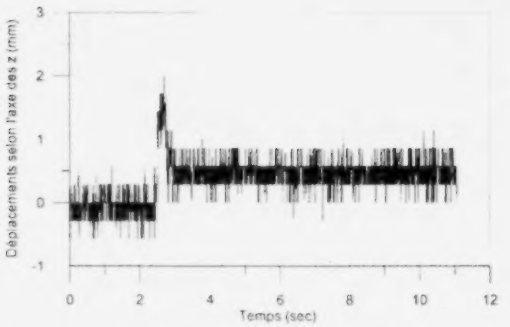


Figure A.28 Essai 5-4 : Déplacement de la lisse selon l'axe z

A-3 RÉSULTATS DE LA SÉRIE 6

A-3.1 Essai statique 6-3 sur un montant

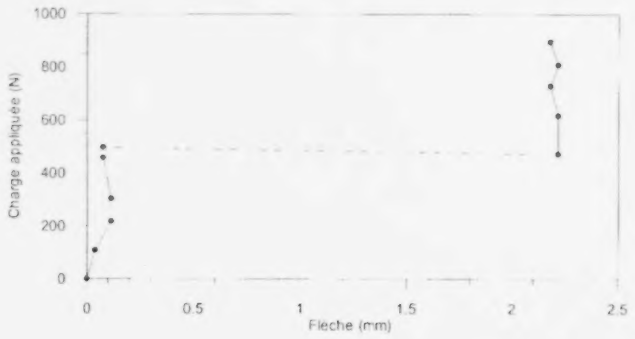


Figure A.29 Essai 6-3 : Déplacement du montant selon la charge appliquée

A-3.2 Essai statique 6-4 sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps

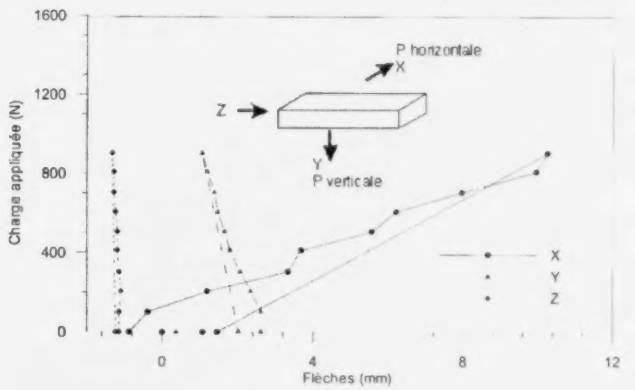


Figure A.30 Essai 6-4 : Déplacement de la lisse supérieure selon la charge appliquée

A-3.3 Essai statique 6-5 sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps en bois

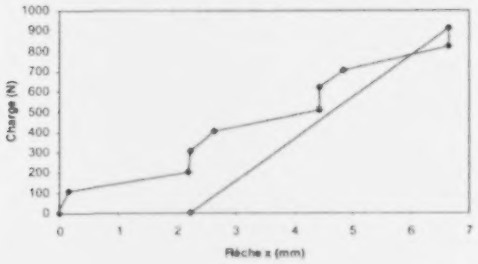


Figure A.31 Essai 6-5 : Déplacement de la lisse selon l'axe des x

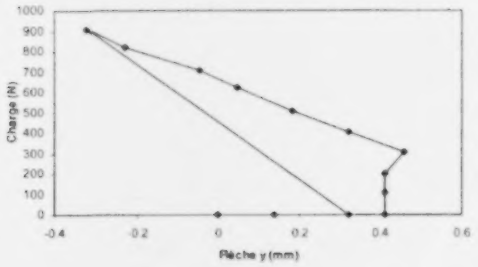


Figure A.32 Essai 6-5 : Déplacement de la lisse selon l'axe des y

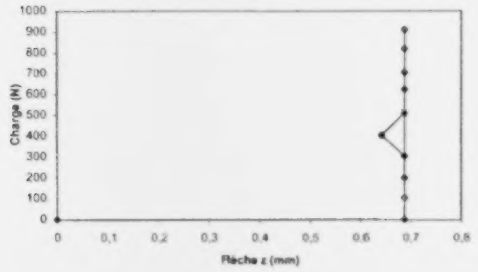


Figure A.33 Essai 6-5 : Déplacement de la lisse selon l'axe z

A-3.4 Essai statique 6-6 sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps en bois

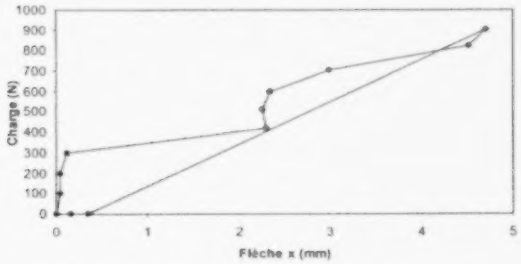


Figure A.34 Essai 6-6 : Déplacement de la lisse selon l'axe des x

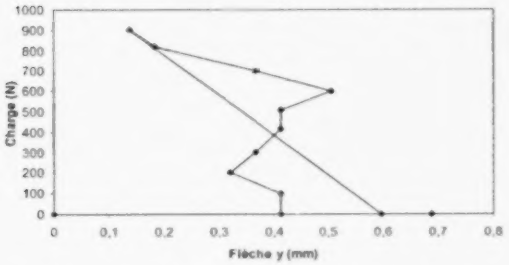


Figure A.35 Essai 6-6 : Déplacement de la lisse selon l'axe des y

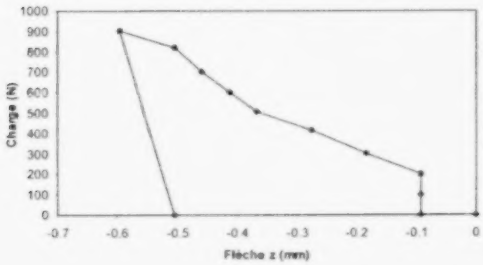


Figure A.36 Essai 6-6 : Déplacement de la lisse selon l'axe z

A-4 RÉSULTATS DE LA SÉRIE 7

A-4.1 Essai dynamique 7-1 sur un étai métallique (garde-corps en bois)

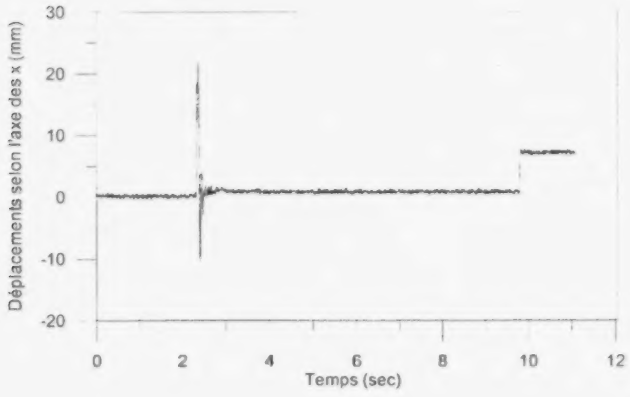


Figure A.37 Essai 7-1 : Déplacement de l'étai métallique selon l'axe des x

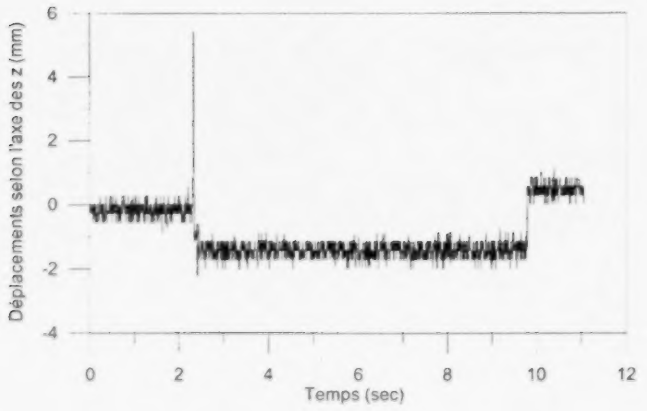


Figure A.38 Essai 7-1 : Déplacement de l'étai métallique selon l'axe des z

A-4.2 Essai dynamique 7-2 sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois

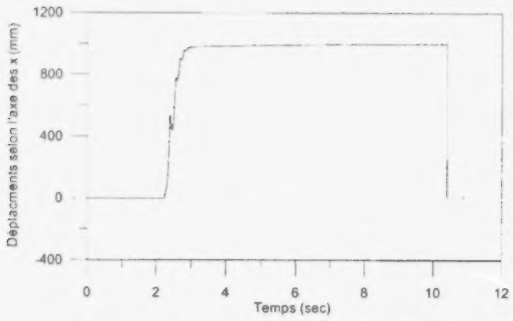


Figure A.39 Essai 7-2 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x

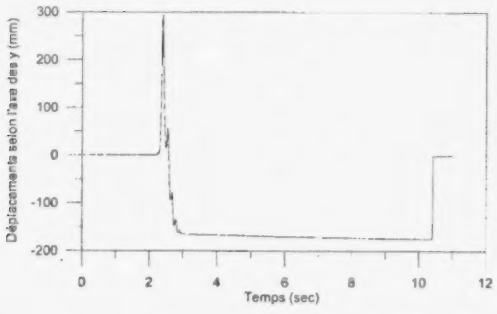


Figure A.40 Essai 7-2 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y

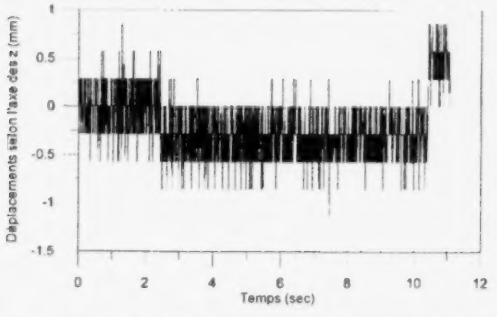


Figure A.41 Essai 7-2 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe z

A-4.3 Essai dynamique 7-3 sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps en bois

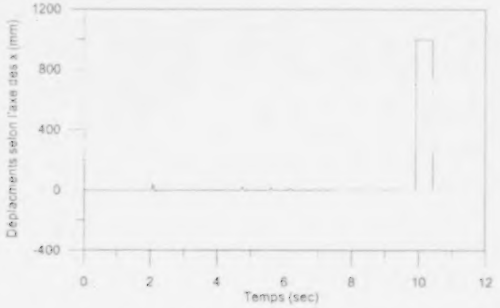


Figure A.42 Essai 7-3 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x

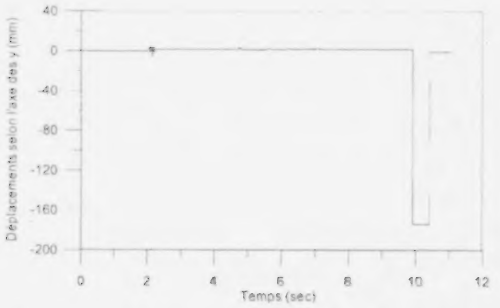


Figure A.43 Essai 7-3 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y

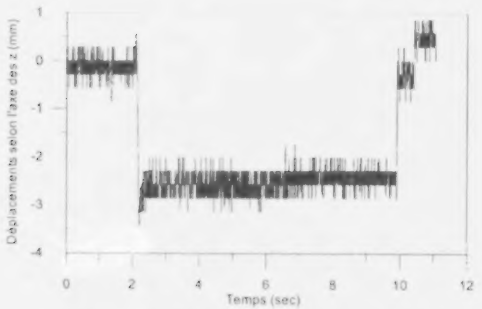


Figure A.44 Essai 7-3 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe z

A-4.4 Essai dynamique 7-4 sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps en bois

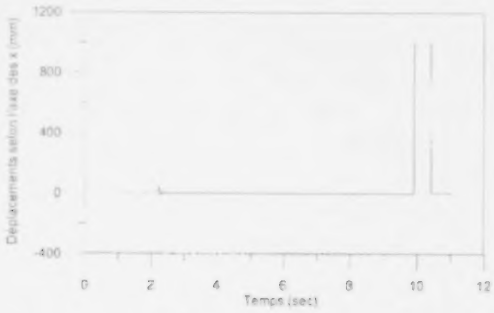


Figure A.45 Essai 7-4 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x

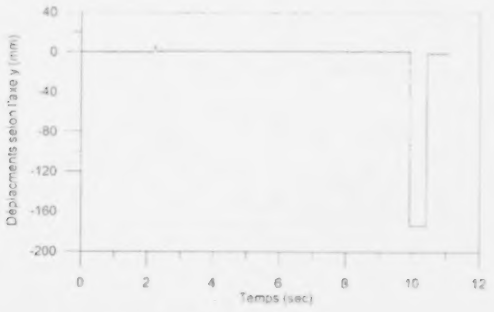


Figure A.46 Essai 7-4 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y

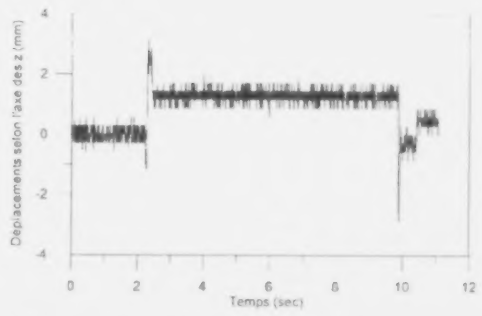


Figure A.47 Essai 7-4 : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe z

A-5 RÉSULTATS DE LA SÉRIE 8

A-5.1 Essai de basculement 8-1a : Lisse en bois située à une hauteur de 1,1 m

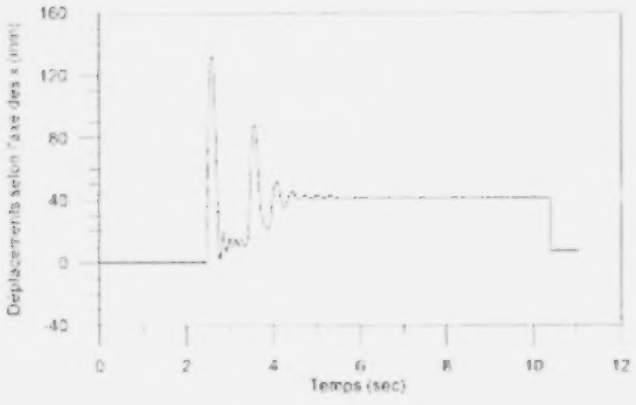


Figure A.48 Essai 8-1a : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x

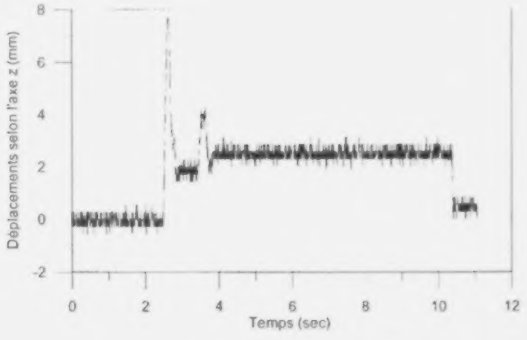


Figure A.49 Essai 8-1a : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z

A-5.2 Essai de basculement 8-1b : Lisse en bois située à une hauteur de 1.0 m

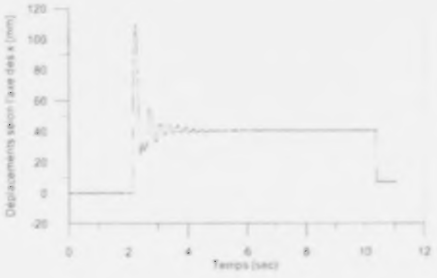


Figure A.50 Essai 8-1b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x

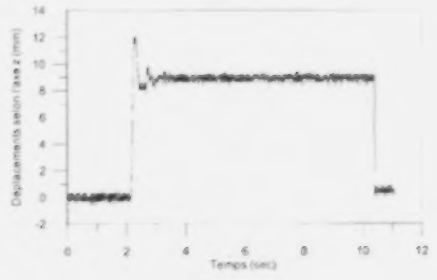


Figure A.52 Essai 8-1b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z

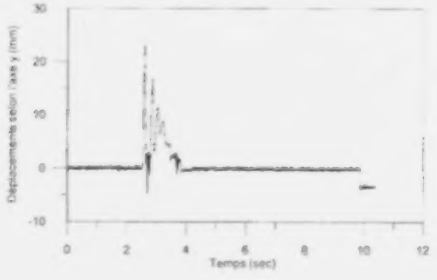


Figure A.54 Essai 8-1c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y

A-5.3 Essai de basculement 8-1c : Lisse en bois située à une hauteur de 0.9 m

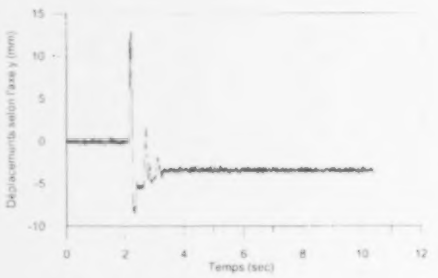


Figure A.51 Essai 8-1b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y

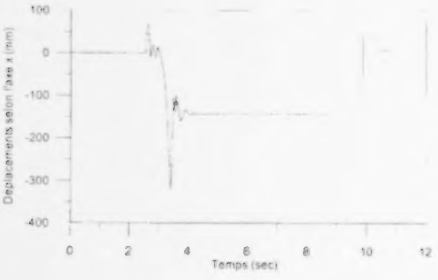


Figure A.53 Essai 8-1c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x

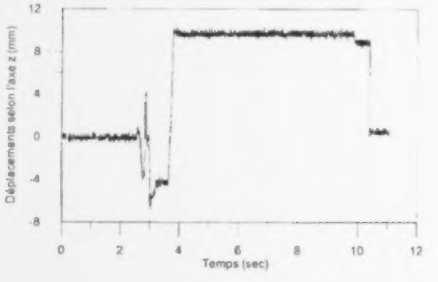


Figure A.55 Essai 8-1c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z

A-5.4 Essai de basculement 8-2a (reprise) : Lisse supérieure flexible composée d'un câble de polypropylène de ¾ po. situé à une hauteur de 1.1 m

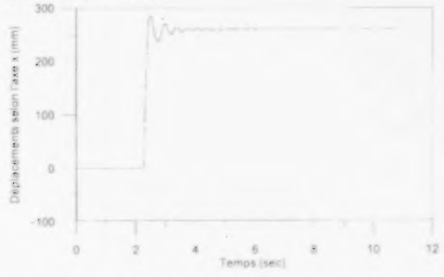


Figure A.56 Essai 8-2a (reprise) : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x

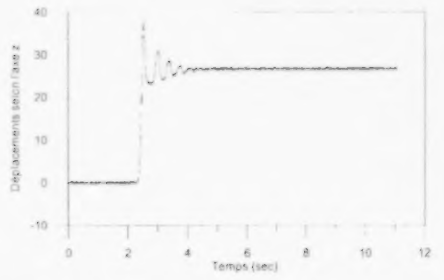


Figure A.58 Essai 8-2a (reprise) : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z

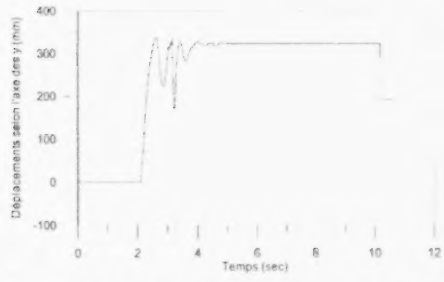


Figure A.60 Essai 8-2b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y

A-5.5 Essai de basculement 8-2b : Lisse supérieure flexible composée d'un câble de polypropylène de ¾ po. situé à une hauteur de 1.0 m

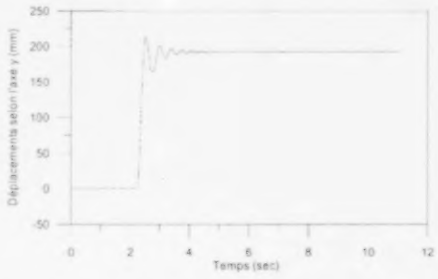


Figure A.57 Essai 8-2a (reprise) : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y

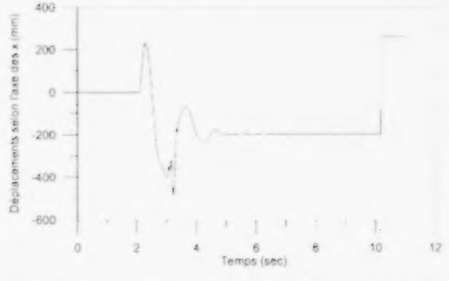


Figure A.59 Essai 8-2b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x

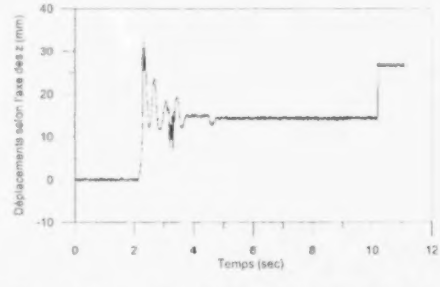


Figure A.61 Essai 8-2b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z

A-5.6 Essai de basculement 8-2c : Lisse supérieure flexible composée d'un câble de polypropylène de ¾ po. situé à une hauteur de 0.9 m

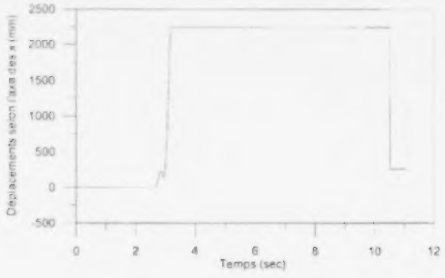


Figure A.62 Essai 8-2c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x

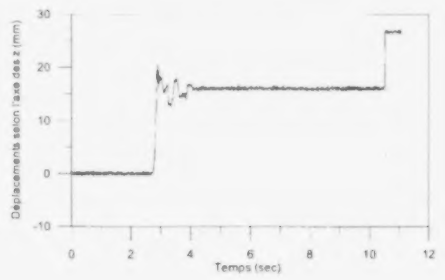


Figure A.64 Essai 8-2c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z

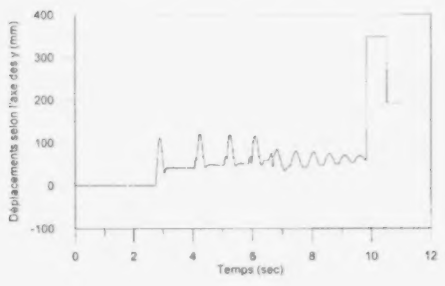


Figure A.66 Essai 8-3a : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y

A-5.7 Essai de basculement 8-3a : Lisse supérieure composée d'un câble en acier situé à une hauteur de 1.1 m

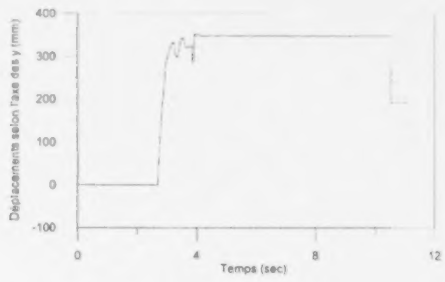


Figure A.63 Essai 8-2c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y

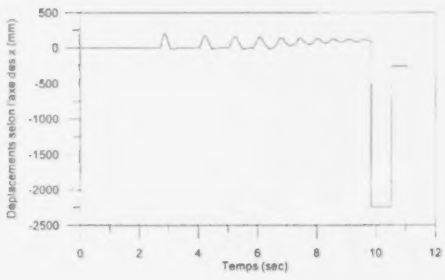


Figure A.65 Essai 8-3a : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x

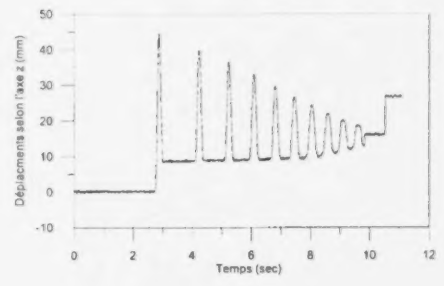


Figure A.67 Essai 8-3a : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z

A-5.8 Essai de basculement 8-3b : Lisse supérieure composée d'un câble en acier situé à une hauteur de 1.0 m

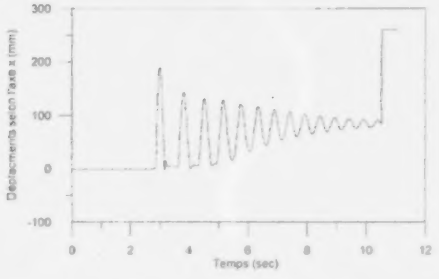


Figure A.68 Essai 8-3b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x

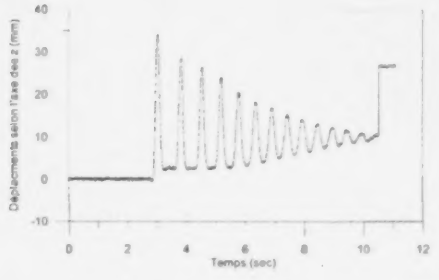


Figure A.70 Essai 8-3b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z

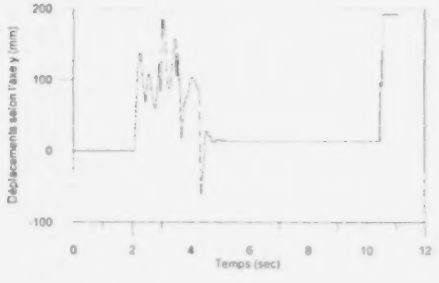


Figure A.72 Essai 8-3c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y

A-5.9 Essai de basculement 8-3c : Lisse supérieure composée d'un câble en acier situé à une hauteur de 0.9 m

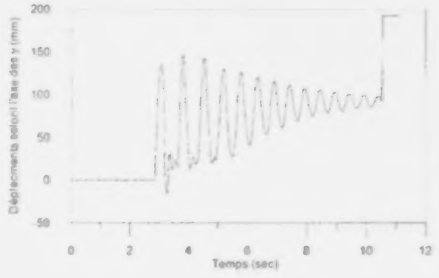


Figure A.69 Essai 8-3b : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des y

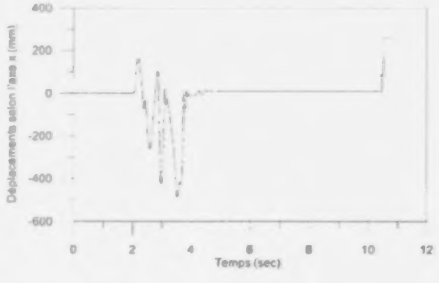


Figure A.71 Essai 8-3c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des x

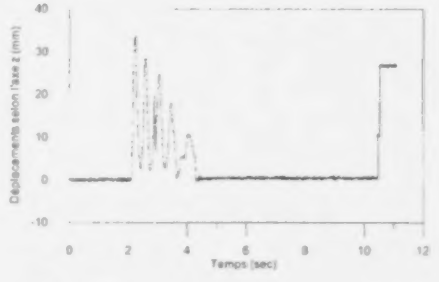


Figure A.73 Essai 8-3c : Déplacement de la lisse supérieure selon l'axe des z

ANNEXE B (B-1, B-2, B-3, B-4, B-5 ET B-6)

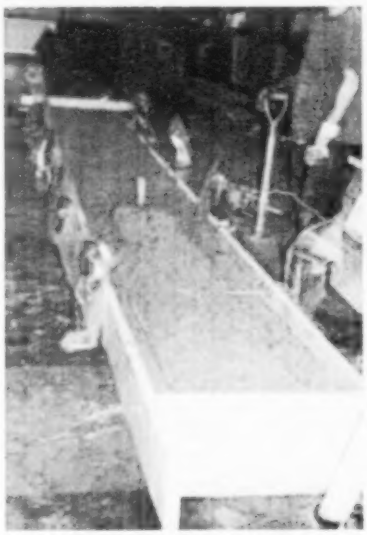
PHOTOS DES ESSAIS

LISTE DES FIGURES DE L'ANNEXE B

Figure B.1 Fabrication des dalles supérieure et inférieure 133
Figure B.2 Assemblage des garde-corps à la dalle inférieure 134
Figure B.3 Essai 4-1a : Essai statique sur un montant en bois 135
Figure B.4 Essai4-1b : Essai statique sur un montant en bois 136
Figure B.5 Essai 4-1c : Essai statique sur un montant en bois 137
Figure B.6 Essai 4-1 supp : Essai statique sur un montant en bois 138
Figure B.7 Essai 4-2 : Essai statique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps 139
Figure B.8 Essai 4-2 : Essai statique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps (suite) 140
Figure B.9 Essai 4-3 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps 141
Figure B.10 Essai 4-4 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps 142
Figure B.11 Essai 5-1 : Essai dynamique sur un montant de garde-corps en bois 143
Figure B.12 Essai 5-2 : Essai dynamique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois 143
Figure B.13 Essai 5-3 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps 144
Figure B.14 Essai 5-4 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps en bois 144
Figure B.15 Essai 6-1 : Mesure de la force selon le nombre de tours de serrage 145
Figure B.16 Essai 6-2 : Détermination du coefficient de friction 146
Figure B.17 Essai 6-3 : Essai statique sur un montant 146
Figure B.18 Essai 6-4 : Essai statique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps 147
Figure B.19a) Essai 6-5 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps 147
Figure B.19b) Essai 6-5 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps 147
Figure B.20 Essai 6-6 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps 147
Figure B.21 Essai 7-1 : Essai dynamique sur un étai métallique (garde-corps en bois) 148
Figure B.22 Essai 7-2 : Essai dynamique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois 148
Figure B.23 Essai 7-3 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps en bois 149
Figure B.24 Essai 7-4 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps en bois 149
Figure B.25 Essai 8-1a : Essai de basculement avec la lisse supérieure en bois à une hauteur de 1.1 m 150
Figure B.26 Essai 8-1b : Essai de basculement avec lisse supérieure en bois à une hauteur de 1.0 m 150
Figure B.27 Essai 8-1c : Essai de basculement avec lisse supérieure en bois à une hauteur de 0.9 m 151
Figure B.28 Essai 8-2a : Essai de basculement avec lisse supérieure composée d'un câble de polypropylène situé à une hauteur de 1.1 m 152
Figure B.29 Essai 8-2b : Essai de basculement avec lisse supérieure composée d'un câble de polypropylène situé à une hauteur de 1.0 m 152

Figure B.30 Essai 8-2c : Essai de basculement avec lisse supérieure composée d'un câble de polypropylène situé à une hauteur de 0,9 m 153
Figure B.31 Essai 8-3a : Essai de basculement avec lisse supérieure composée d'un câble d'acier situé à une hauteur de 1.1 m 153
Figure B.32 Essai 8-3b : Essai de basculement avec lisse supérieure composée d'un câble d'acier situé à une hauteur de 1.0 m 153
Figure B.33 Essai 8-3c : Essai de basculement avec lisse supérieure composée d'un câble d'acier situé à une hauteur de 0,9 m 154

B-1 PRÉPARATIFS AUX ESSAIS



a)

b)

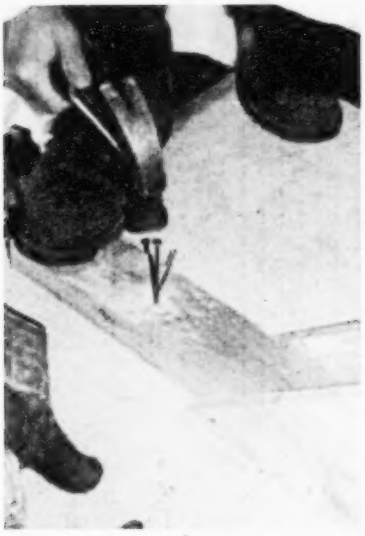
c)

d)

Figure B.1 Fabrication des dalles supérieure et inférieure

a)

b)

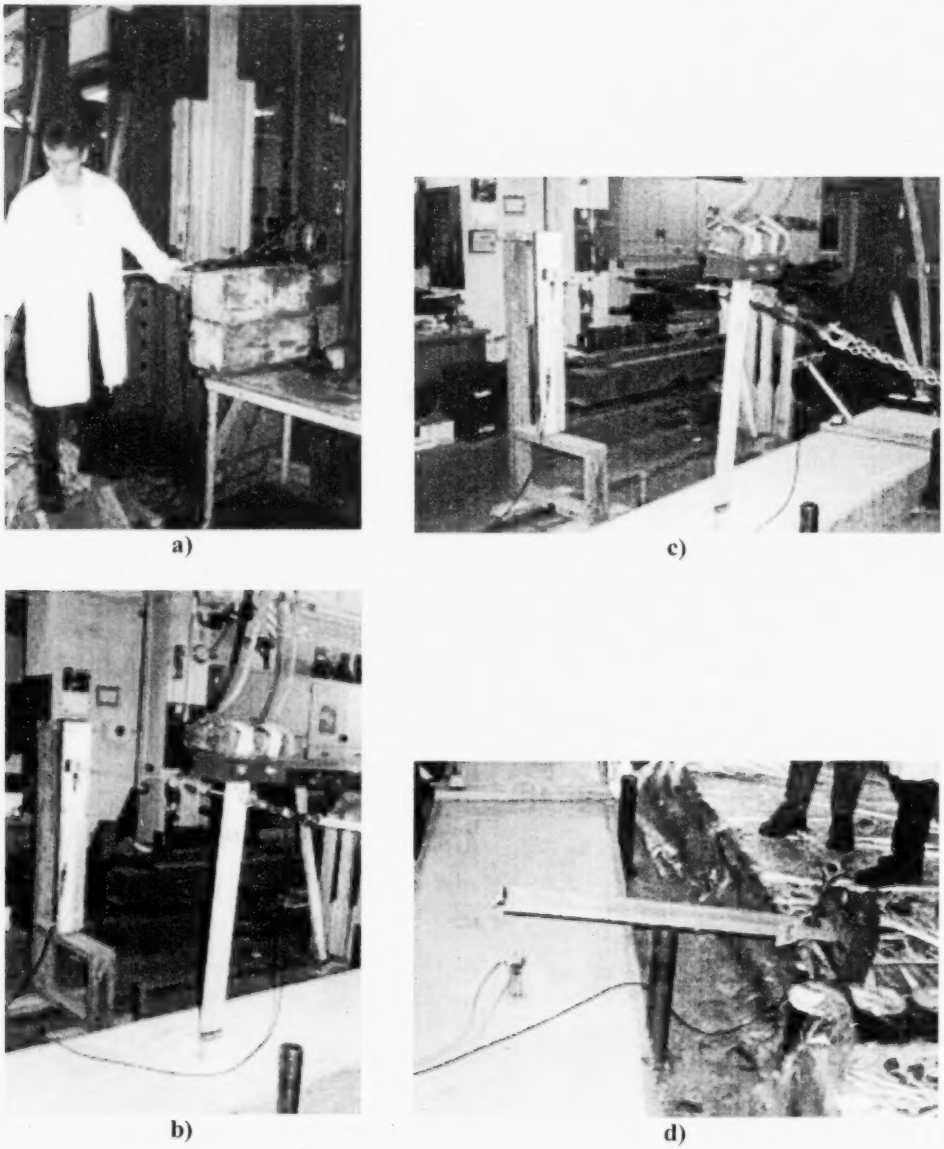


c)

d)

Figure B.2 Assemblage des garde-corps à la dalle inférieure

B-2 PHOTOS DE LA SÉRIE 4



a) c)

b) d)

Figure B.3 Essai 4-1a : Essai statique sur un montant en bois

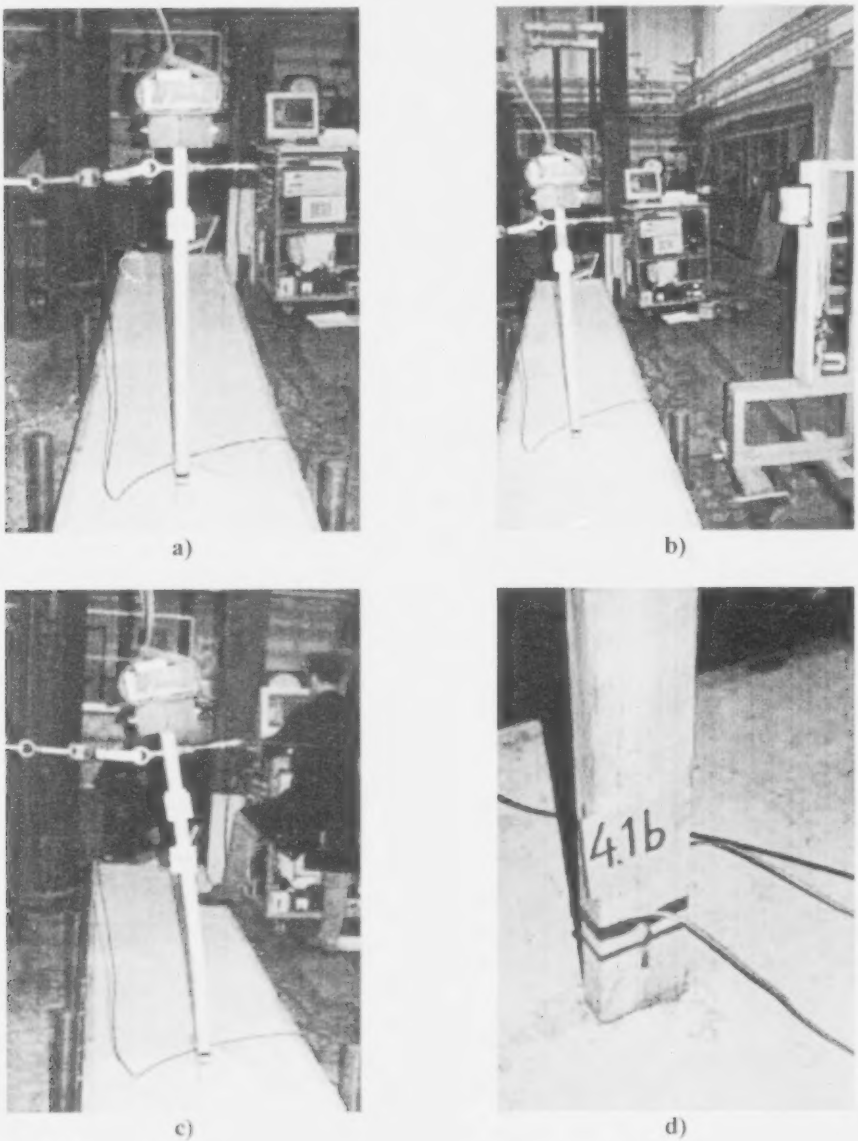


Figure B.4 Essai4-1b : Essai statique sur un montant en bois

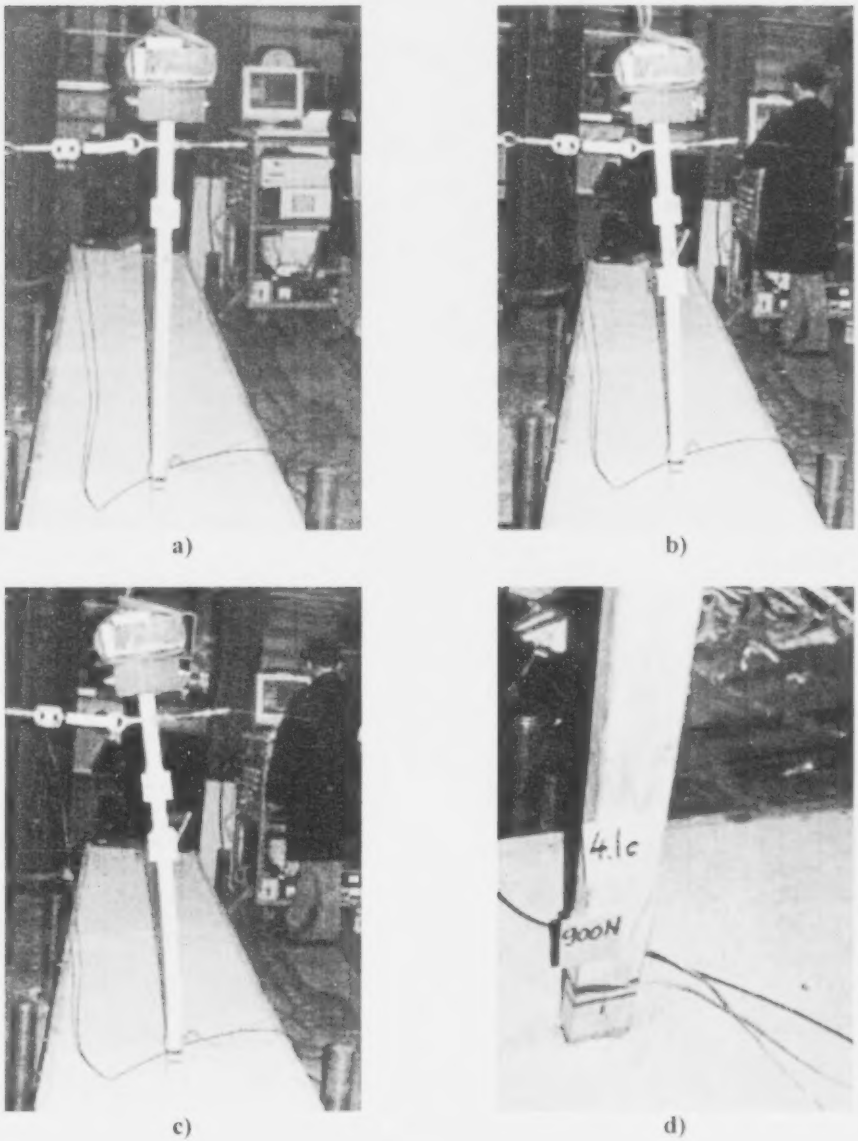
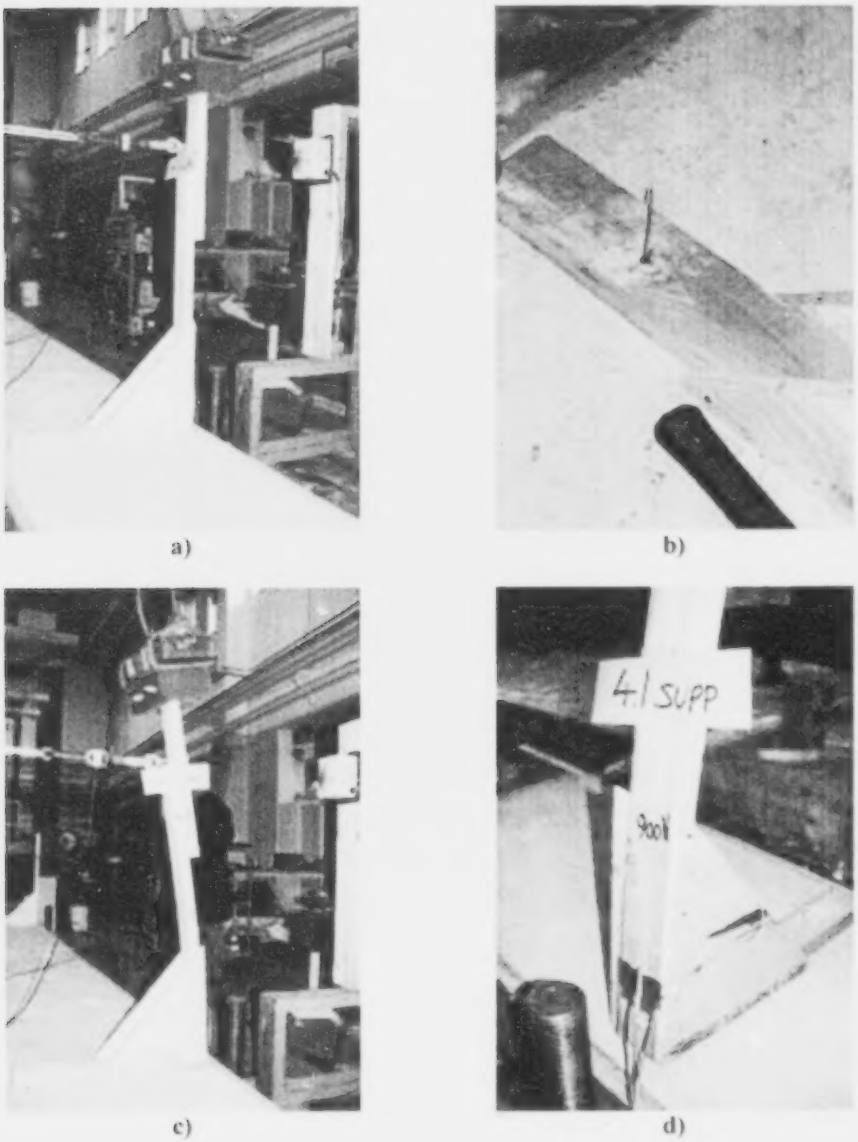


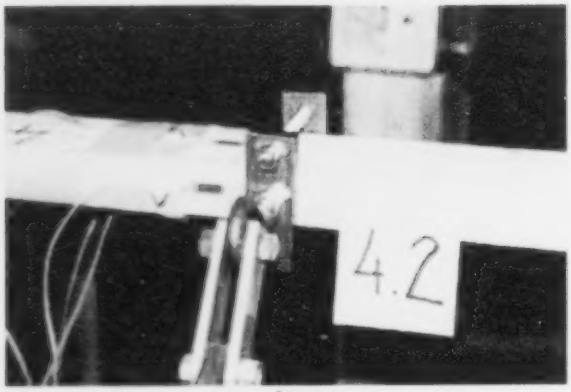
Figure B.5 Essai 4-1c : Essai statique sur un montant en bois



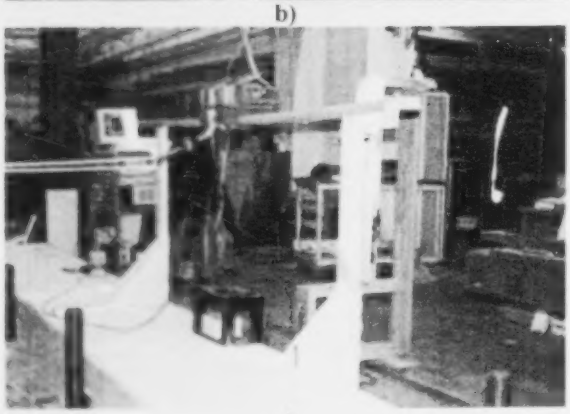
a) b) c) d)

Figure B.6 Essai 4-1 supp : Essai statique sur un montant en bois

a)



b)



c)

Figure B.7 Essai 4-2 : Essai statique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps

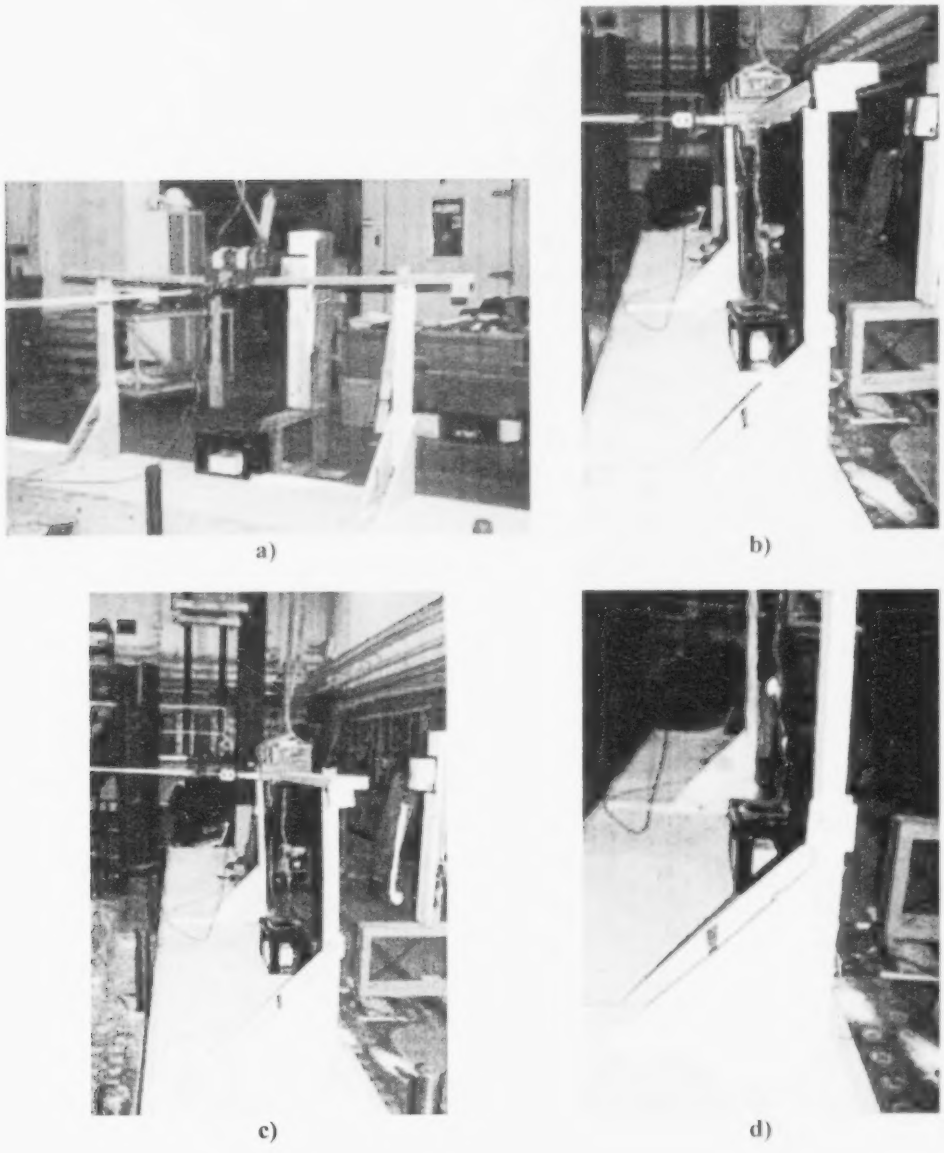


Figure B.8 Essai 4-2 : Essai statique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps (suite)

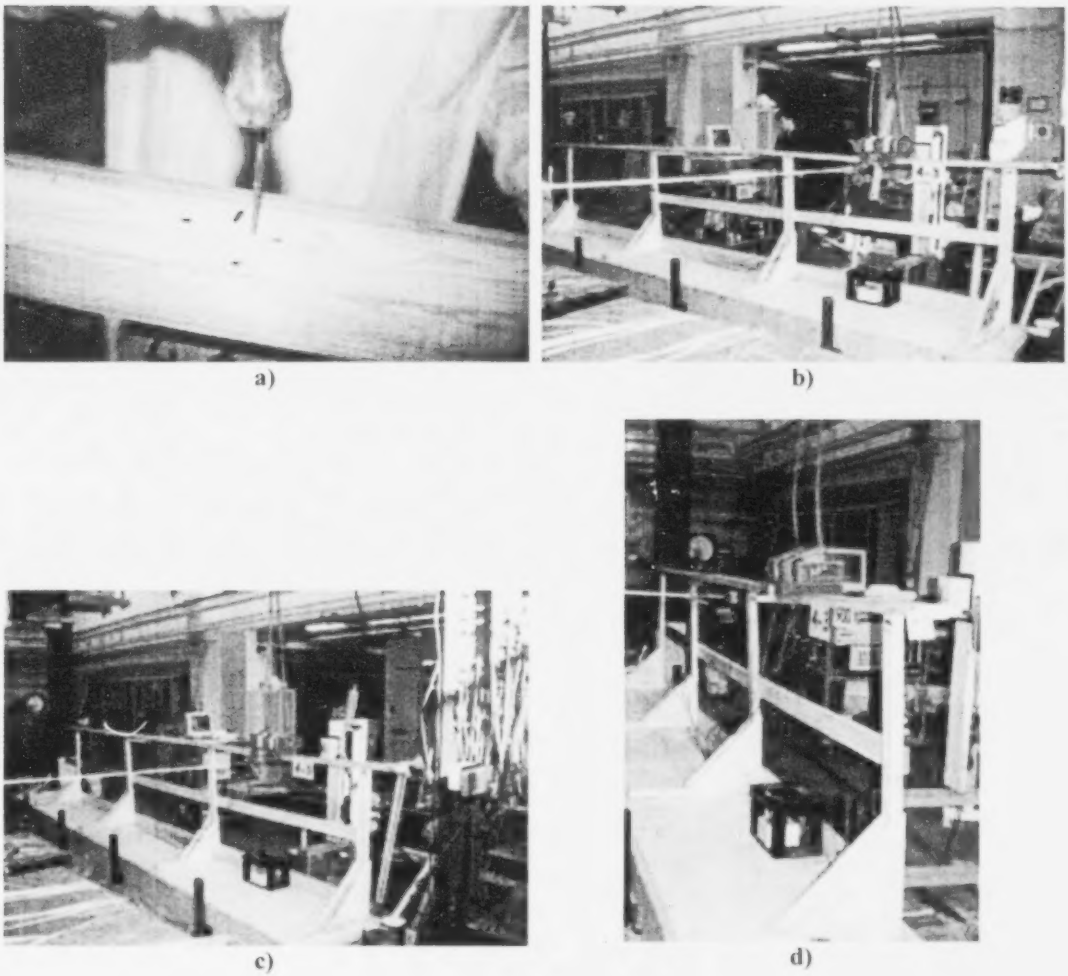


Figure B.9 Essai 4-3 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps

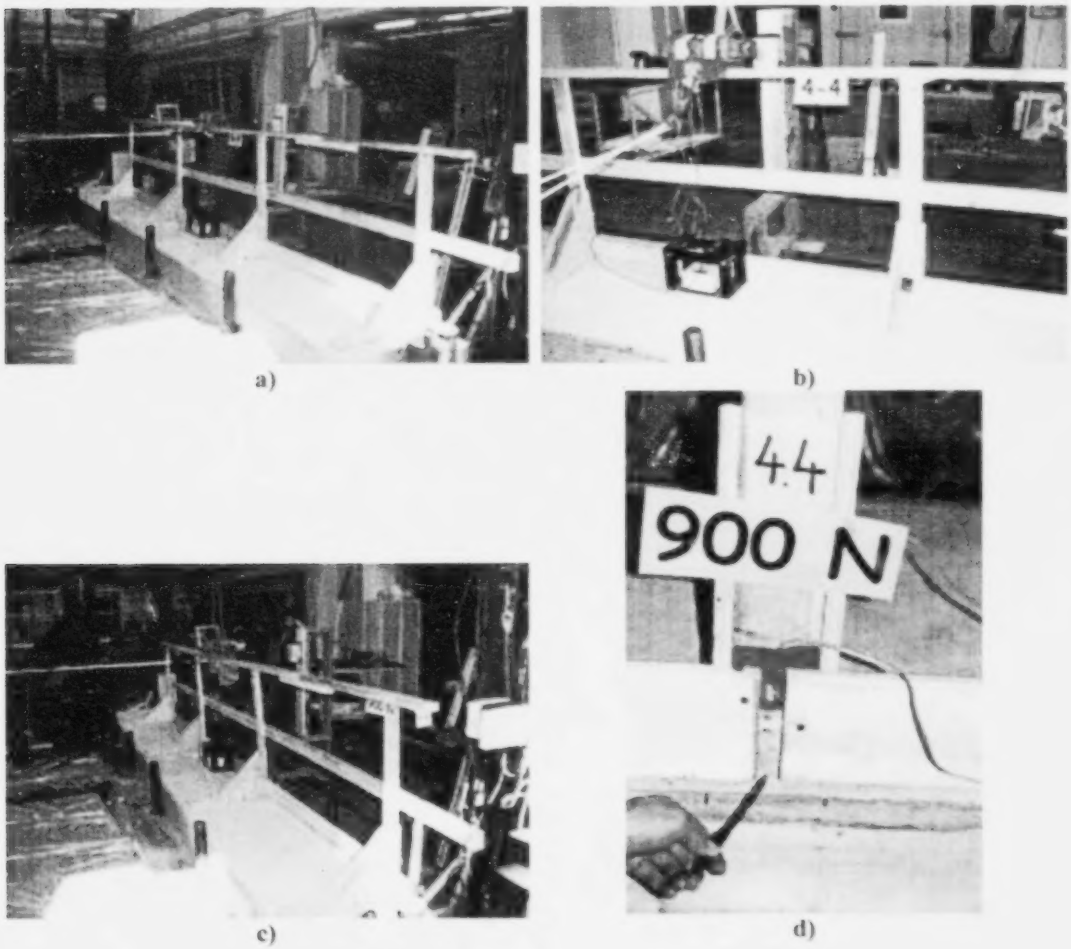
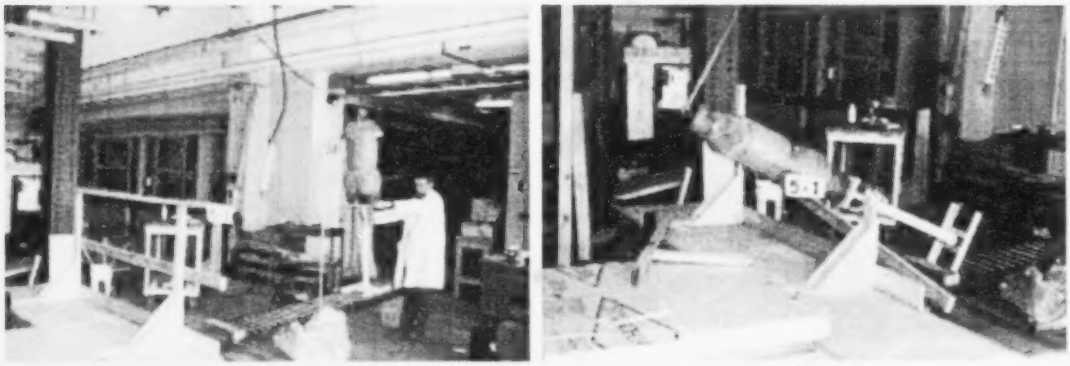


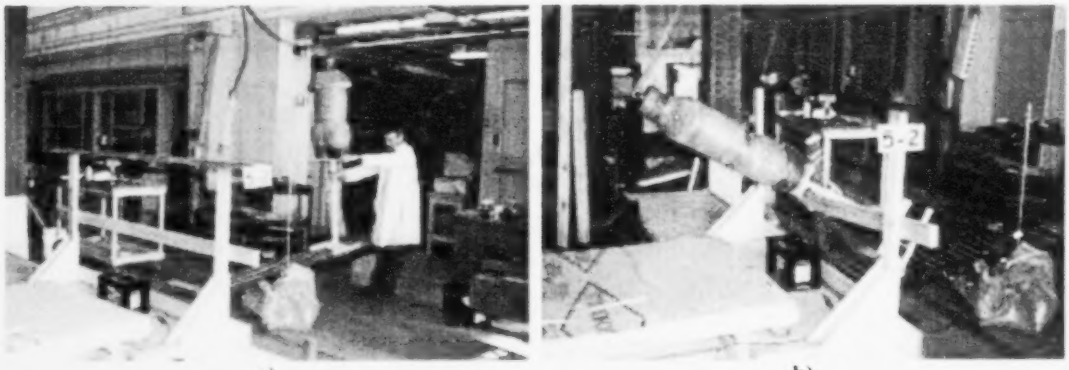
Figure B.10 Essai 4-4 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps

B-3 PHOTOS DE LA SÉRIE 5



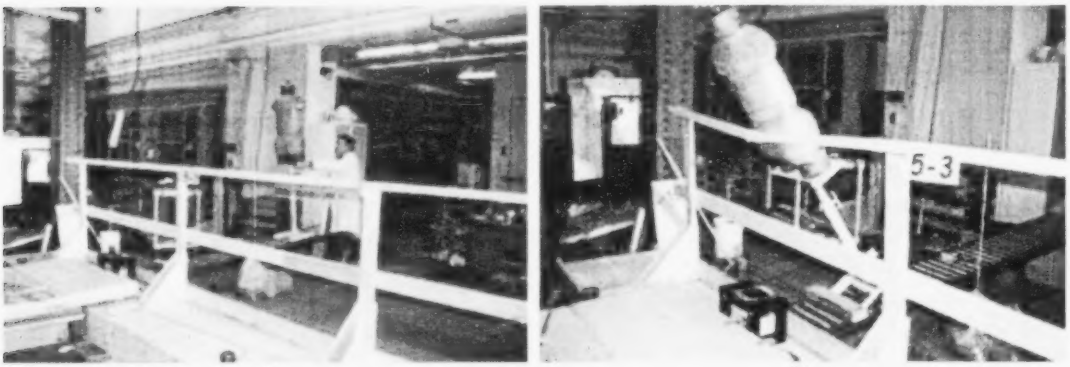
a) b)

Figure B.11 **Essai 5-1 : Essai dynamique sur un montant de garde-corps en bois**



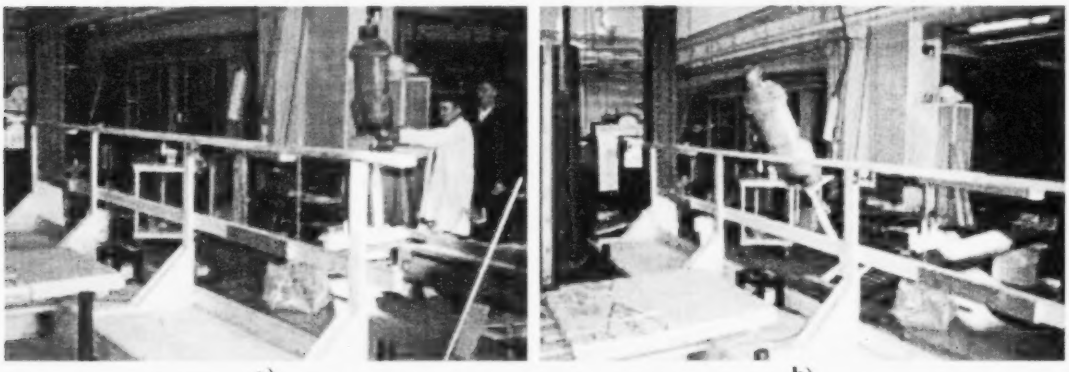
a) b)

Figure B.12 Essai 5-2 : Essai dynamique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois



a) b)

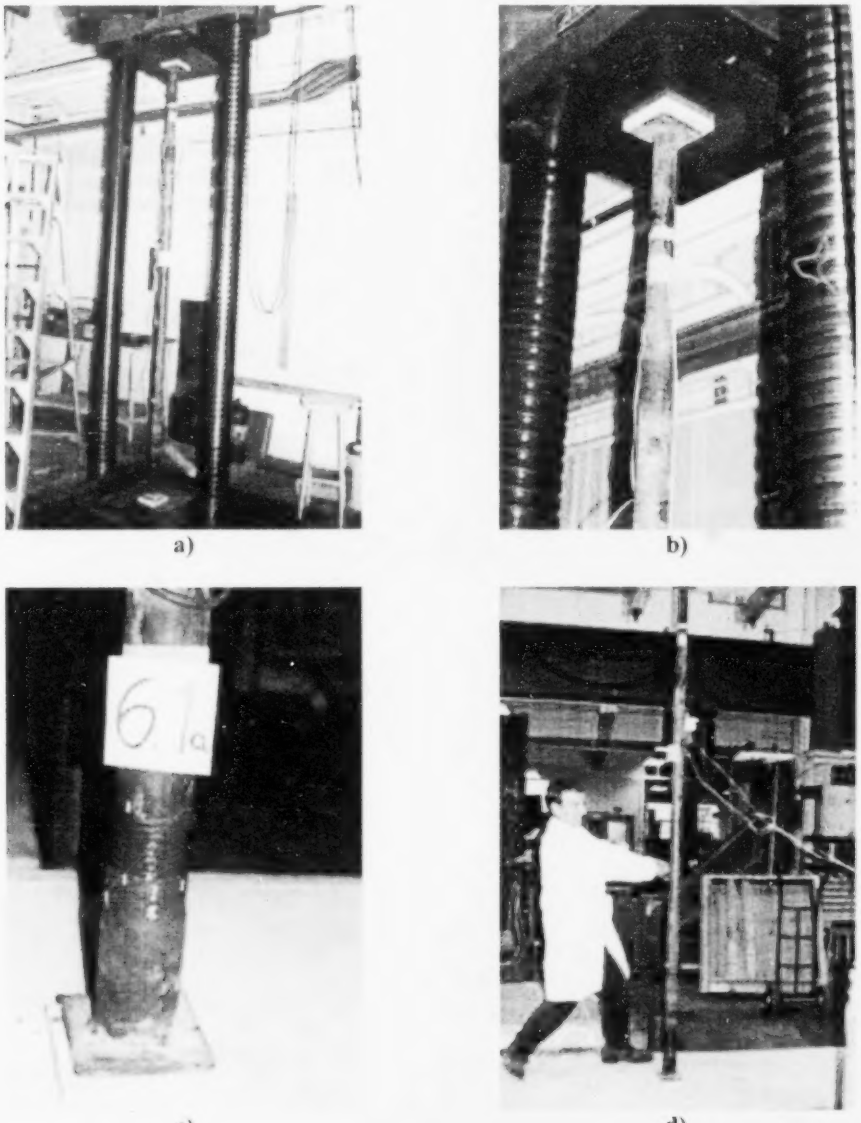
Figure B.13 **Essai 5-3 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps**



a) b)

Figure B.14 Essai 5-4 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps en bois

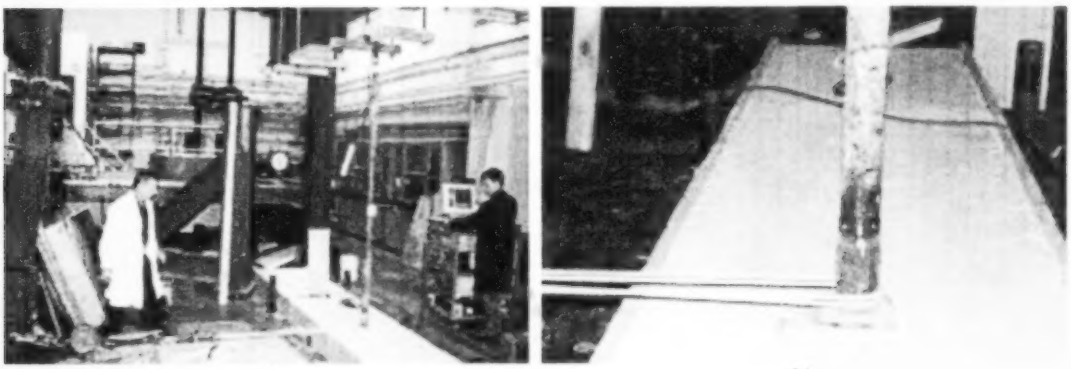
B-4 PHOTOS DE LA SÉRIE 6



a) b)

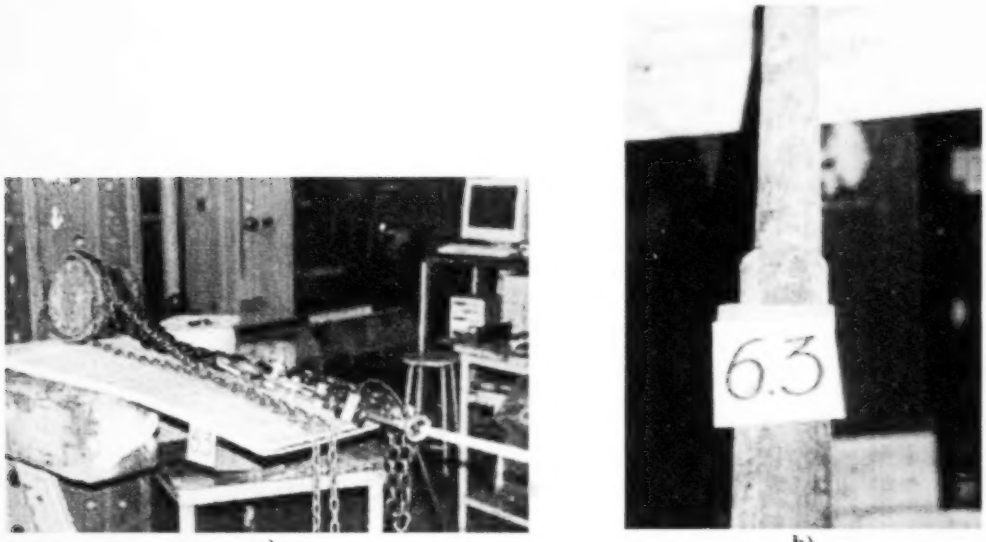
c) d)

Figure B.15 Essai 6-1 : Mesure de la force selon le nombre de tours de serrage



a) b)

Figure B.16 Essai 6-2 : Détermination du coefficient de friction



a) b)

Figure B.17 Essai 6-3 : Essai statique sur un montant

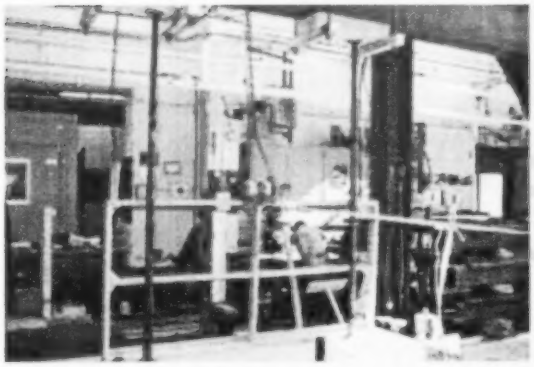
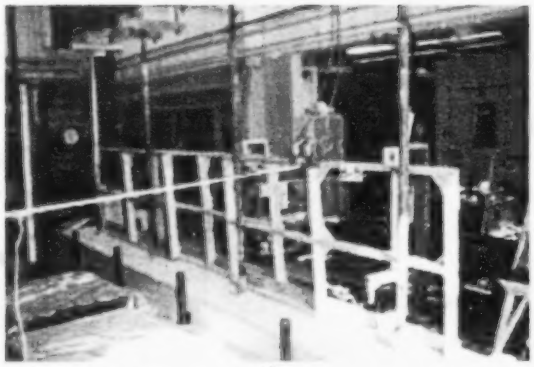
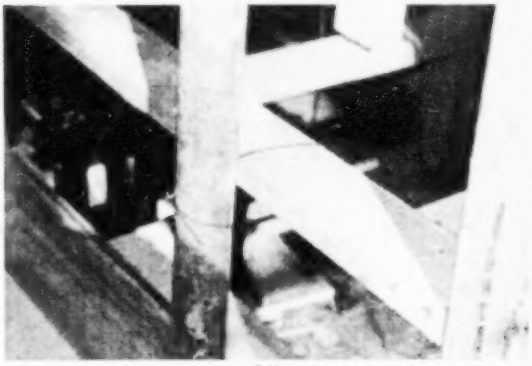


Figure B.18 Essai 6-4 : Essai statique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps



a)

Figure B.19a) Essai 6-5 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps



b)

Figure B.19b) Essai 6-5 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps

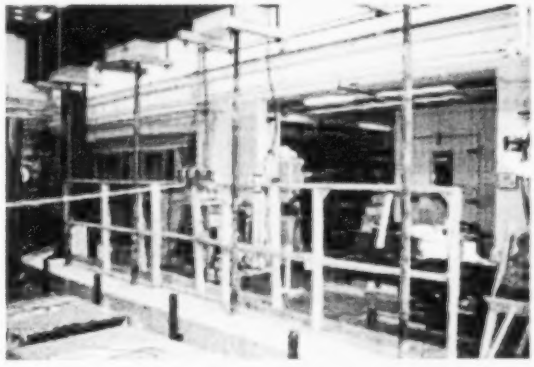
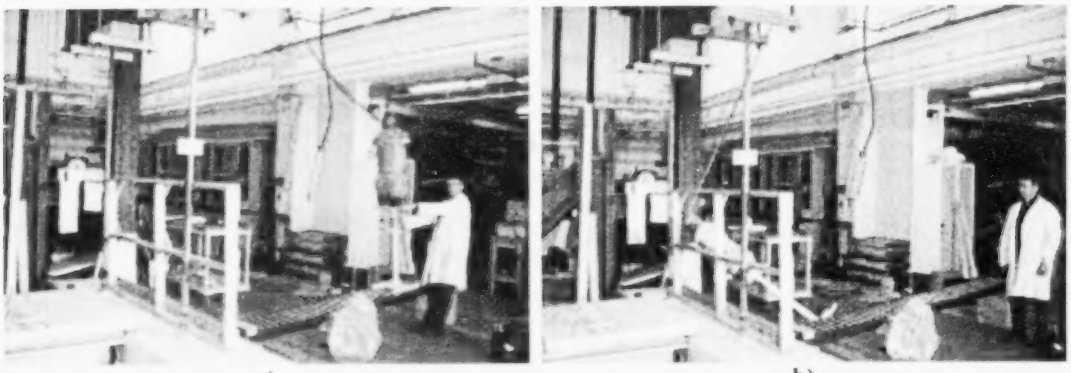


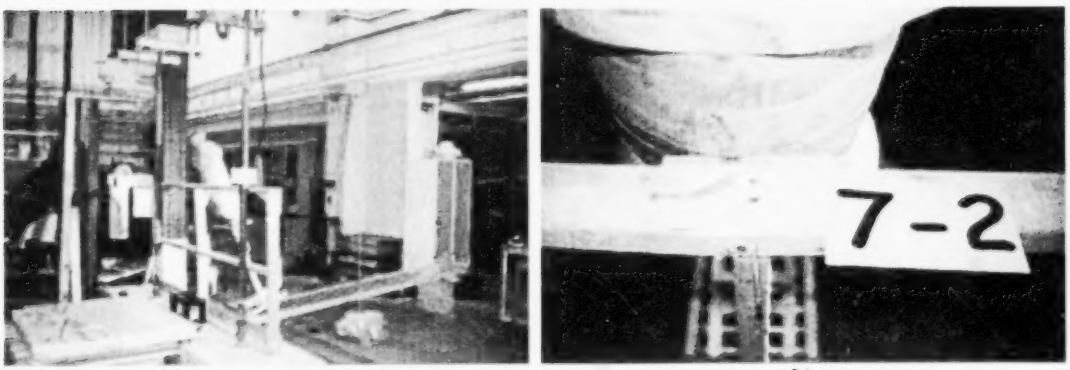
Figure B.20 Essai 6-6 : Essai statique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps

B-5 PHOTOS DE LA SÉRIE 7



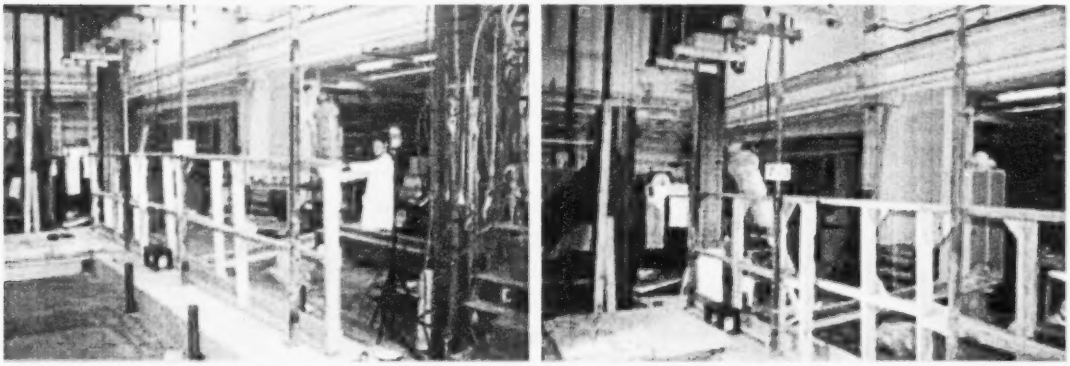
a) b)

Figure B.21 Essai 7-1 : Essai dynamique sur un étai métallique (garde-corps en bois)



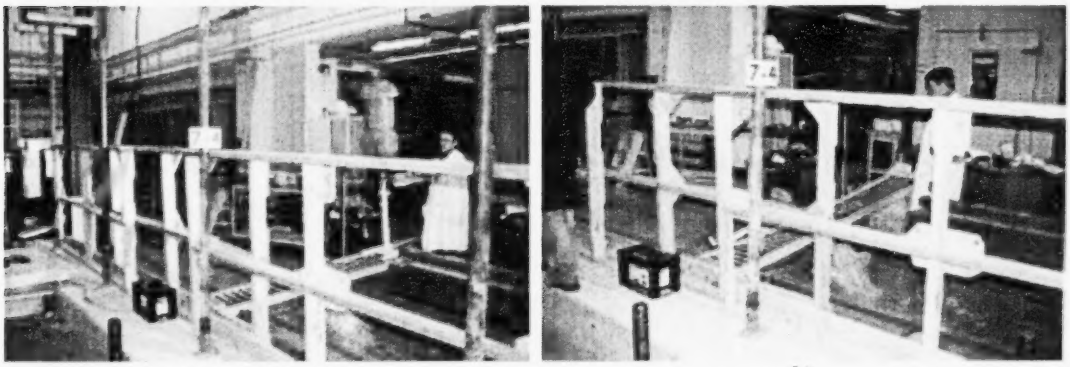
a) b)

Figure B.22 Essai 7-2 : Essai dynamique sur la lisse supérieure d'une section de garde-corps en bois



a) b)

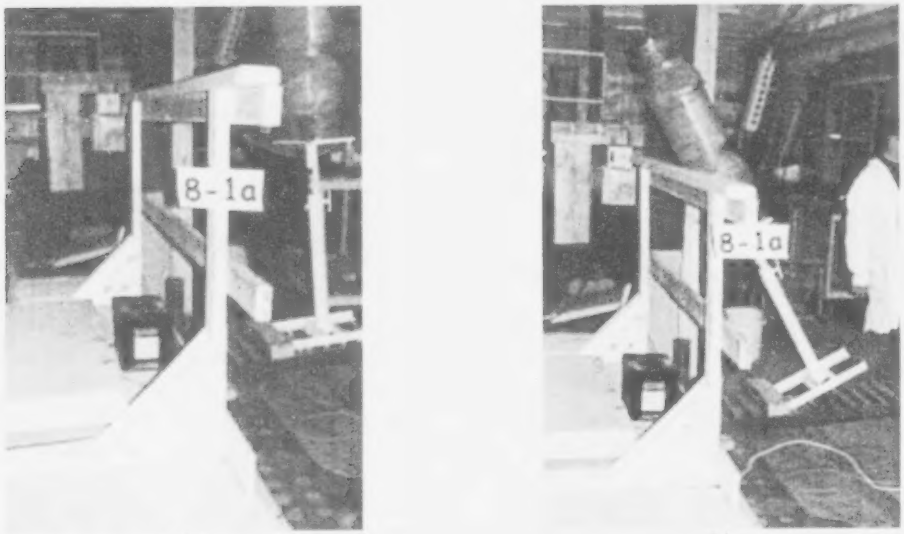
Figure B.23 Essai 7-3 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section de rive d'une suite de trois sections de garde-corps en bois



a) b)

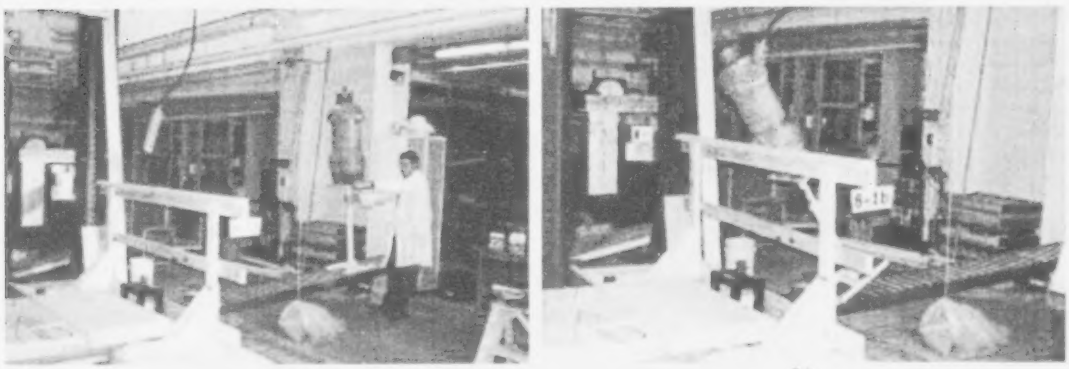
Figure B.24 Essai 7-4 : Essai dynamique sur la lisse supérieure de la section centrale d'une suite de trois sections de garde-corps en bois

B-6 PHOTOS DE LA SÉRIE 8



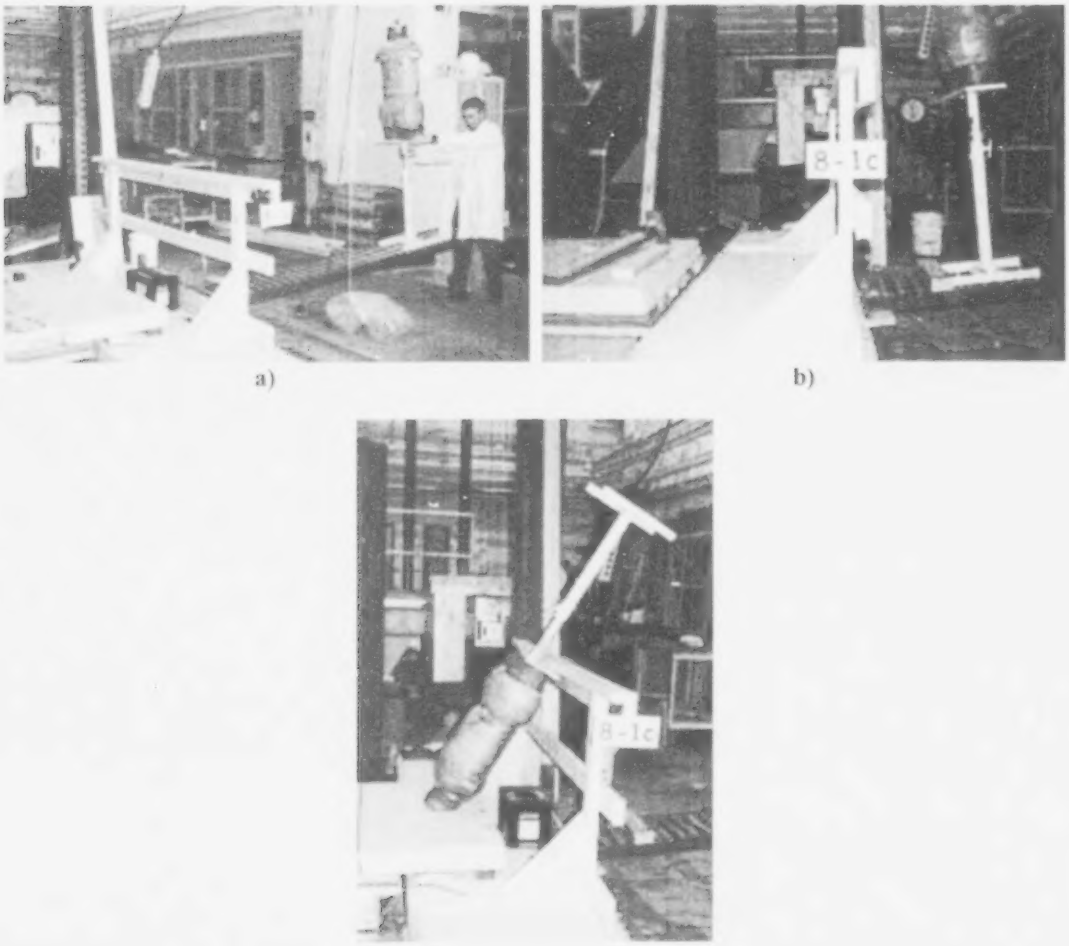
a) b)

Figure B.25 Essai 8-1a : Essai de basculement avec la lisse supérieure en bois à une hauteur de 1.1 m



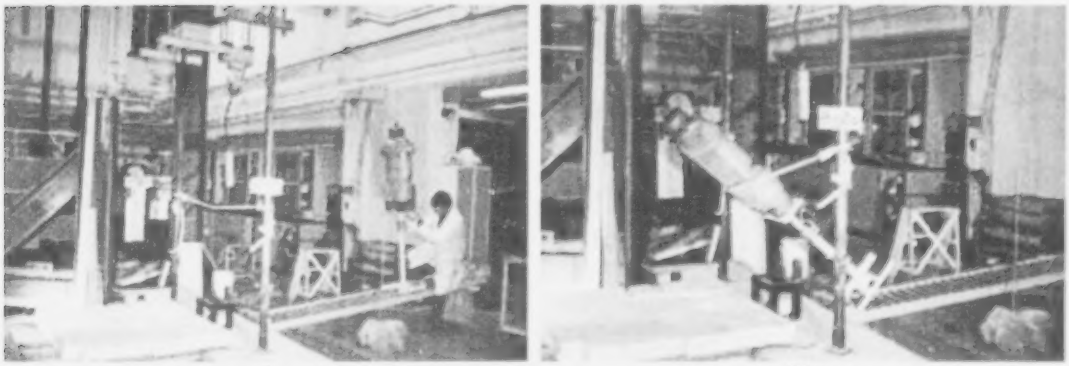
a) b)

Figure B.26 Essai 8-1b : Essai de basculement avec lisse supérieure en bois à une hauteur de 1.0 m



a) b)

Figure B.27 Essai 8-1c : Essai de basculement avec lisse supérieure en bois à une hauteur de 0.9 m



a) b)

Figure B.28 Essai 8-2a : Essai de basculement avec lisse supérieure composée d'un câble de polypropylène situé à une hauteur de 1.1 m

Figure B.29 Essai 8-2b : Essai de basculement avec lisse supérieure composée d'un câble de polypropylène situé à une hauteur de 1.0 m

a) b)

Figure B.30 Essai 8-2c : Essai de basculement avec lisse supérieure composée d'un câble de polypropylène situé à une hauteur de 0,9 m

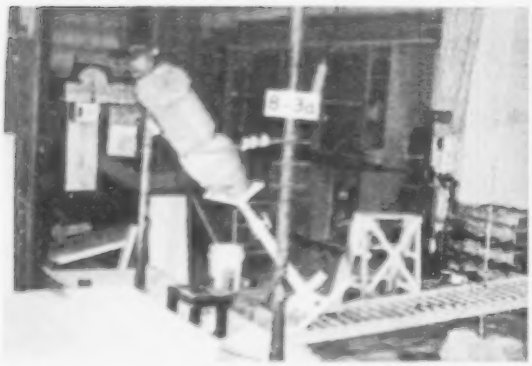


Figure B.31 Essai 8-3a : Essai de basculement avec lisse supérieure composée d'un câble d'acier situé à une hauteur de 1.1 m

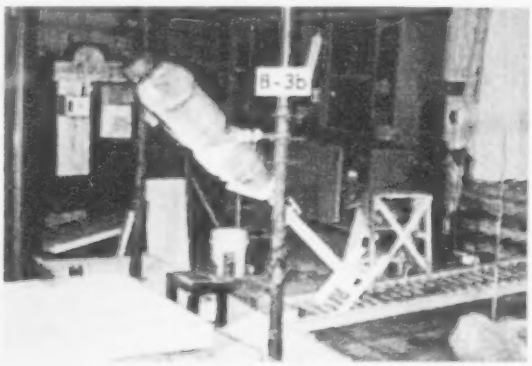
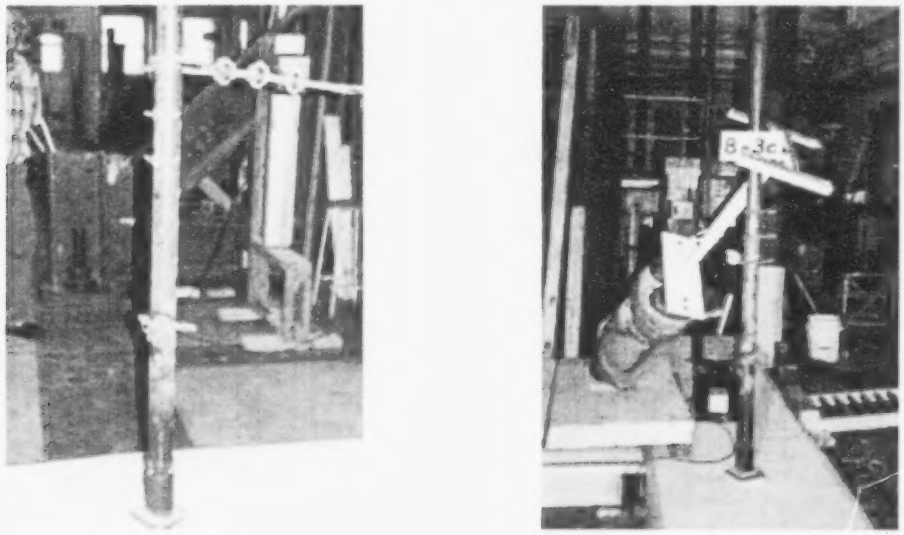


Figure B.32 **Essai 8-3b : Essai de basculement avec lisse supérieure composée d'un câble d'acier situé à une hauteur de 1.0 m**



a) b)

Figure B.33 Essai 8-3c : Essai de basculement avec lisse supérieure composée d'un câble d'acier situé à une hauteur de 0,9 m

ANNEXE C

MODÉLISATION DU GARDE-CORPS PAR UN PORTIQUE À DEUX MONTANTS ENCASTRÉS SOLLICITÉ PAR UNE CHARGE PONCTUELLE P ET/OU UNE CHARGE UNIFORMÉMENT RÉPARTIE (Goulet, 1976)

1. MODÉLISATION DU GARDE-CORPS – PORTIQUE À DEUX MONTANTS ENCASTRÉS SOLLICITÉ PAR UNE CHARGE PONCTUELLE P (GOULET, 1976)

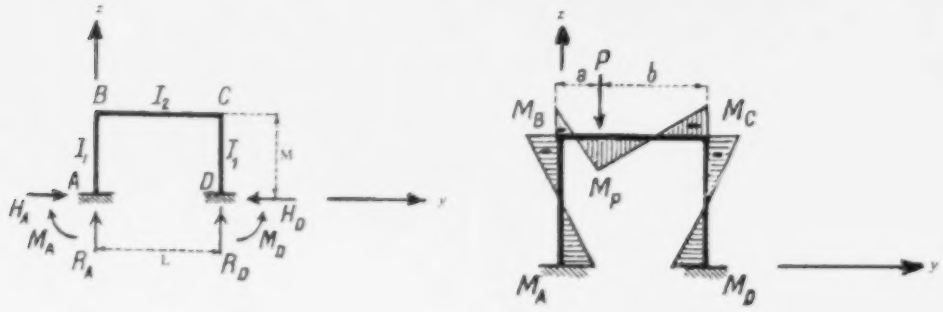


Figure 1 : Portique à deux montants encastrés sollicité par une charge ponctuelle P

Légende :

L	:	Portée du portique
M	:	Hauteur du portique
I_1	:	Moment d'inertie du montant
I_2	:	Moment d'inertie de la travée
P	:	Charge ponctuelle
H_A	:	Réaction horizontale à l'appui A
H_D	:	Réaction horizontale à l'appui D
R_A	:	Réaction verticale à l'appui A
R_D	:	Réaction verticale à l'appui D
M_A	:	Moment d'encastrement à l'appui A
M_D	:	Moment d'encastrement à l'appui D
M_B	:	Moment d'encastrement en B
M_C	:	Moment d'encastrement en C
M_P	:	Moment en travée sous la charge P

Notation :

$$k = \frac{I_2}{I_1} \times \frac{M}{L}$$

$$\alpha = \frac{a}{L}$$

$$R_A = P(1-\alpha)\frac{6k+1+\alpha-2\alpha^2}{6k+1}$$

$$R_D = P\alpha\frac{6k+3\alpha-2\alpha^2}{6k+1}$$

$$H_A = H_D = \frac{3Pab}{2ML(k+2)}$$

$$M_A = \frac{Pab}{2L}\frac{5k-1+2\alpha(k+2)}{(k+2)(6k+1)}$$

$$M_D = \frac{Pab}{2L}\frac{3+7k-2\alpha(k+2)}{(k+2)(6k+1)}$$

$M_B = M_A - H_A M$

$M_C = M_D - H_D M$

$M_P = M_A - H_A M + R_A a$

Si $a = b = \frac{L}{2}$

$$R_A = R_D = \frac{P}{2}$$

$$H_A = H_D = \frac{3PL}{8M(k+2)}$$

Pour un chargement plan, lorsque le montant est placé avec la plus petite section de 2 pouces qui résiste à la flexion :

Montant : $I_1 = \frac{bh^3}{12}$ par rapport à l'axe x (Figure 54 du rapport)

Lisse : $I_2 = \frac{hb^3}{12}$ par rapport à l'axe x (Figure 54 du rapport)

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{hb^3}{12}\frac{12}{bh^3} = \frac{b^2}{h^2} = \frac{38^2}{89^2} = 0.18$$

Hauteur du montant M = 1.2 m

Longueur de la lisse L = 1.83 m

$$k = \frac{I_2}{I_1}\times\frac{M}{L} = 0.18\times\frac{1.2}{1.83} = 0.12$$

Lorsque le montant est placé avec la plus grande section de 4 pouces qui résiste à la flexion

Montant : $I_1 = \frac{hb^3}{12}$ par rapport à l'axe x

Lisse : $I_2 = \frac{hb^3}{12}$ par rapport à l'axe x

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{hb^3}{12}\frac{12}{hb^3} = 1$$

Hauteur du montant M = 1.2 m

Longueur de la lisse L = 1.83 m

$$k = \frac{I_2}{I_1} \times \frac{M}{L} = 1 \times \frac{1.2}{1.83} = 0.66$$

2 MODÉLISATION DU GARDE-CORPS – PORTIQUE À DEUX MONTANTS ENCASTRÉS SOLLICITÉ PAR UNE CHARGE UNIFORMÉMENT RÉPARTIE P (GOULET, 1976)

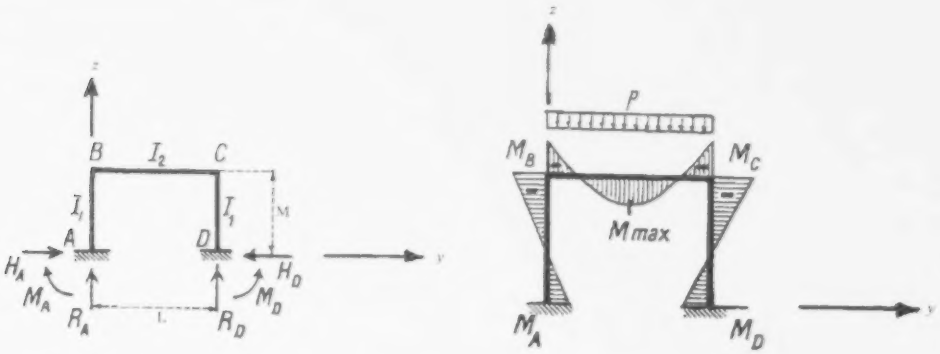


Figure 2 : Portique à deux montants encastrés sollicité par une charge uniformément répartie p

Légende :

L	:	Portée du portique
M	:	Hauteur du portique
I_1	:	Moment d'inertie du montant
I_2	:	Moment d'inertie de la travée
p	:	Charge uniformément répartie sollicitant la travée
H_A	:	Réaction horizontale à l'appui A
H_D	:	Réaction horizontale à l'appui D
R_A	:	Réaction verticale à l'appui A
R_D	:	Réaction verticale à l'appui D
M_A	:	Moment d'encastrement à l'appui A
M_D	:	Moment d'encastrement à l'appui D
M_B	:	Moment d'encastrement en B
M_C	:	Moment d'encastrement en C
M_{max}	:	Moment maximal en travée sous la charge uniformément répartie p

Notation

$$k = \frac{I_2}{I_1} \times \frac{M}{L}$$

k = 0.12 lorsque la petite dimension de 2 pouces résiste
k = 0.66 lorsque la grande dimension de 4 pouces résiste

$$R_A = R_D = \frac{pL}{2}$$

$$H_A = H_D = \frac{pL^2}{4M(k+2)}$$

$$M_A = M_D = \frac{pL^2}{12(k+2)}$$

$$M_B = M_C = \frac{pL^2}{6(k+2)}$$

$$M_{max} = \frac{pL^2}{24}\frac{3k+2}{k+2}$$